

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
MAXIME BRIEN

MESURE DE L'ÉROSION DES BERGES, DU RAVINEMENT ET DE LA
MIGRATION DES COURS D'EAU DANS LA PORTION AGRICOLE DU BASSIN
VERSANT DE LA RIVIÈRE DES ENVIES (QUÉBEC)

DÉCEMBRE 2006

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Cette section de mon mémoire vise à remercier toutes les personnes qui ont collaborés de différentes façons à l'achèvement de ce projet. Qu'ils soient des membres de ma famille, amis, partenaires du projet, collaborateurs scientifiques, intervenants divers, tous ont contribué à leur manière à la cueillette de données, à la résolution de problèmes, à la correction de documents, au soutien moral de l'auteur...

Premièrement, je suis très reconnaissant envers mon directeur, Stéphane Campeau qui, par son enthousiasme persistant, son encadrement efficace ainsi que la grande confiance qu'il m'a toujours témoignée, m'a permis de pleinement développer mon potentiel en recherche. Je tiens aussi à le remercier pour son soutien financier qui m'a permis d'effectuer ce cheminement sans inquiétude financière. Un merci spécial lui est aussi dédié pour avoir cru en un projet de recherche imaginé par des étudiants (moi-même et Yann Boissonneault).

En second lieu, ma reconnaissance va à Pierre-André Bordeleau pour l'encadrement géomatique et les conseils judicieux qui ont fait évoluer une phase très technique mais très fondamentale de mon projet de recherche. Dans le même cadre, je tiens à souligner la contribution de Daniel Blais du MDDEP (DPÉDD).

Puis, je remercie tous ceux qui ont participé à de nombreuses campagnes de collectes de données sur le terrain, soit Yann Boissonneault, Guillaume Dénomée, Martine Grenier, Marie-Claude Hill, Sophie Lacoursière, Alexandre Lacroix, David-Jones Maguire, Olivier Mathieu, Martin Matteau, Émilie Stichelbout, Amélie Turcot, Mylène Vallée et tous ceux qui ne figurent pas dans cette liste mais qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à ce projet. Mes remerciements vont aussi à Mario et Marie-Claude Lefebvre puis à André Fontaine et Micheline Brisebois pour m'avoir fourni un emplacement pour installer des stations de collecte de données météo.

Quatrièmement, je tiens à souligner la contribution de nombreux partenaires à différentes étapes du projet de la rivière des Envies, entre autres, Camille Caron du MAPAQ Mauricie, Sébastien Duchesne de la SAMBBA, Jean-Pierre Ducruc du MDDEP (DPÉDD) et Alexandre Tourigny de l'UPA Mauricie.

Finalement, je tiens à remercier mes parents et amis pour leur appui, leur compréhension et leurs encouragements malgré le peu de temps que je leur ai consacré dans les dernières années. Un merci tout spécial est dédié à ma conjointe Joanne pour sa grande patience et son soutien dans les moments difficiles de cette aventure. Un dernier merci va à mes enfants (Léonis et Zaélie) pour leur simple présence dans ma vie.

Ce projet a fait l'objet d'un financement de la part du Fonds d'action québécois pour le développement durable (FAQDD), du Fonds institutionnels de recherche de l'UQTR et d'une subvention de la Direction des politiques agricoles du ministère de l'Environnement du Québec.

AVANT-PROPOS

Le bassin versant de la rivière des Envies forme le sous-bassin de la rivière Batiscan où la concentration d'entreprises agricoles est la plus élevée. Conséquemment, cette rivière subit une forte pression environnementale due à des apports de sédiments et de nutriments liés à l'érosion des berges et des sols puis au ruissellement de surface qui entraînent une partie des matières fertilisantes qui sont appliquées dans les champs par des agriculteurs désireux d'augmenter la productivité de leur terres. Certaines pratiques agricoles (la culture dans le sens de la pente, l'accès des animaux aux cours d'eau et le déboisement et la mise en culture des bandes riveraines) ont un impact direct sur la qualité de l'eau de la rivière des Envies et de ces principaux tributaires. Ainsi, en plus d'une turbidité importante, les apports de phosphore, de nitrites et de nitrates et de coliformes fécaux sont ce qui affectent le plus la qualité de l'eau.

Récemment, de nombreux partenaires se sont regroupés dans le Comité des Envies (CDE) pour réduire la pollution diffuse en provenance des terres agricoles. De l'information et du financement ont été offerts aux propriétaires riverains pour effectuer des travaux de stabilisation et de réhabilitation de berges. Toutefois, les programmes de restauration des rives à l'échelle du bassin versant nécessitent une bonne connaissance des processus d'érosion des berges et des sources de matières en suspension transportées vers les cours d'eau, avant que soient effectués des aménagements.

C'est dans cette optique que le Laboratoire de recherche sur les bassins versants (LBV) de la Section de géographie de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) a mis sur pied avec de nombreux partenaires, l'Étude intégrée du bassin versant de la rivière des Envies. Cette étude a permis, entre autres, d'étudier la qualité de l'eau de la rivière et de ses tributaires, **l'érosion des berges**, l'état des bandes riveraines, l'occupation du territoire, les pratiques agricoles et les caractéristiques des écosystèmes aquatiques. Les mesures réalisées permettront d'évaluer quels seraient les aménagements et les méthodes de conservation des sols les plus efficaces et les moins coûteux pour réduire l'érosion des berges et des sols et les apports de nutriments aux cours d'eau. L'objectif étant

l'amélioration de la qualité de l'eau du bassin versant de la rivière des Envies. Enfin, l'étude servira de support à la prise de décision concernant l'aménagement et la restauration du bassin versant et permettra le développement d'un protocole de suivi afin d'évaluer la réponse des cours d'eau et de leurs écosystèmes au programme de restauration.

Le projet d'étude intégrée du bassin versant de la rivière des Envies est supervisé par le professeur Stéphane Campeau de l'UQTR. Parmi les nombreux partenaires qui collaborent à cette étude, on compte la Fédération de l'UPA de la Mauricie (FUPAM), la Société d'aménagement et de mise en valeur du bassin de la Batiscan (SAMBBA), la Direction régionale de la Mauricie du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), la Direction régionale de la Mauricie du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), la Direction du suivi de l'état de l'environnement du MDDEP et la Direction du patrimoine écologique et du développement durable du MDDEP.

RÉSUMÉ

Dans ce projet de recherche, une méthodologie a été développée pour l'application d'un système de stéréophotogrammétrie numérique à la spatialisation et la quantification de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies. Ce bassin versant, situé dans le sud-ouest du Québec (Canada), chevauche deux provinces géologiques, soit le bouclier canadien et les basses-terres du Saint-Laurent. Ce chevauchement engendre trois patrons d'écoulement différents: rectiligne dans le bouclier, encaissé dans les basses-terres et méandré dans la vallée mitoyenne. Les mesures ont été réalisées sur un intervalle de 22 ans (1975-1997) pour les basses-terres et la vallée mitoyenne. Des vecteurs géoréférencés ont été tracés à partir de photographies aériennes au 1: 15 000 numérisées et géoréférencées afin de localiser les crêtes de berges (érosion des berges et ravinement) et les marges latérales des cours d'eau (migration des cours d'eau). Ils ont ensuite été intégrés et superposés dans un système d'information géographique (SIG) pour spatialiser et quantifier les processus à l'étude en termes de taux de recul et de migration, de superficies, de volumes et de tonnage. Un bilan sédimentaire partiel a aussi été effectué. Celui-ci indique que 12 454 tonnes/année de sédiments ont été érodés dont 76 % proviennent de la portion de la rivière des Envies située dans les basses-terres. Ce territoire compte aussi pour 67 % des sédiments accumulés, ce qui en fait le secteur le plus dynamique de l'ensemble du bassin versant de la rivière des Envies. La hauteur du talus ainsi que la composition granulométrique des berges pourraient y favoriser l'érosion des berges et le ravinement, alors que le processus de migration des cours d'eau serait le reflet de mouvements latéraux continus des cours d'eau. De plus, ce secteur du bassin versant est celui où les activités agricoles sont en plus forte concentration, ce qui a mené au déboisement et à la mise en culture des bandes riveraines. Ainsi, une large part des berges y sont dénudées et les bandes riveraines arbustives ou arborescentes y sont absentes ou de faible importance. Afin d'évaluer le potentiel du système de stéréophotogrammétrie numérique, une comparaison de l'erreur de vectorisation a été effectuée avec une technique traditionnelle d'analyse de photographies aériennes. Trois interprètes (1 expert et 2 non-experts) ont localisé les

crêtes de berges et les limites latérales de cours d'eau entre deux points fixes (5 sites, 30 répétitions) pour les deux années et les deux techniques. Les résultats obtenus montrent que le système de stéréophotogrammétrie numérique permet d'obtenir une erreur de vectorisation plus faible (moyenne de 0,33 m contre 0,44 m), ce qui indique que ce système de visualisation 3-D permet de mesurer et d'enregistrer des coordonnées plus précises pour des objets dans l'image qu'avec une technique traditionnelle d'analyse de photographies aériennes (visualisation 2-D). Cette estimation de l'erreur de vectorisation a été appliquée aux mesures effectuées afin de fournir une marge supérieure et inférieure d'erreur aux résultats obtenus. Malgré la lourdeur des procédures de préparation des photographies aériennes, la stéréophotogrammétrie numérique s'est avérée rapide et efficace pour spatialiser et quantifier les processus géomorphologiques à l'étude. Elle peut être appliquée à l'échelle d'un bassin versant de taille intermédiaire avec une précision et des coûts intermédiaires entre les techniques aéroportées et les techniques traditionnelles d'analyse de photographies aériennes.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
AVANT-PROPOS	IV
RÉSUMÉ.....	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
CHAPITRE 1 RÉSUMÉ	1
INTRODUCTION	2
1.1 Problématique.....	3
1.2 Site à l'étude	4
1.2.1 Climat.....	5
1.2.2 Hydrographie.....	7
1.2.3 Géologie, dépôts de surface et sols	8
1.2.4 Végétation	10
1.2.5 Utilisation du territoire.....	10
1.2.6 Population	11
1.3 Revue de littérature.....	11
1.3.1 Processus d'érosion.....	11
1.3.1.1 Érosion des berges.....	11
1.3.1.2 Ravinement	14
1.3.1.3 Migration des cours d'eau	16
1.3.2 Apports sédimentaires aux cours d'eau.....	17
1.3.3 Impacts sur la faune et la flore	17
1.3.4 Méthodes de mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau	18
1.3.5 Limitations des différentes méthodes de mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau	20
1.3.6 Avantages de la stéréophotogrammétrie numérique pour la mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau.....	21
1.4 Objectifs de recherche	22
1.5 Méthodologie.....	23
1.6 Résultats.....	25
CONCLUSION.....	27
BIBLIOGRAPHIE	29
CHAPITRE 2 PREMIER ARTICLE	35
RÉSUMÉ	37
ABSTRACT	39
INTRODUCTION	39
2.1 Study site	42

2.2	Measuring streambank erosion, gullyng and lateral channel change using a digital stereophotogrammetric system and a geographic information system	43
2.2.1	Preparation of aerial photographs for feature extraction and creation of the orthophotos	44
2.2.2	Estimating error for image-to-image analysis.....	46
2.2.3	The 3-D Feature Extraction.....	47
2.2.4	Bankfull, streambank gullyng and water-level location	48
2.2.5	Calculating streambank erosion, gullyng and lateral channel change rates	51
2.2.6	Applying total error estimation to eroded- and accretion-area polygons.....	51
2.3	Calculating erosion and accretion volumes from the planimetric measurements	52
2.3.1	DEMs automatic extraction.....	53
2.3.2	Comparing the error for the automatically extracted DEMs with the 3-D Feature Extraction.....	54
2.3.3	Volume and mass of eroded and accumulated sediments.....	55
2.4	The 2-D and 3-D digitizing error comparison	57
	DISCUSSION	58
	CONCLUSION	64
	REFERENCES.....	65
	CHAPITRE 3 DEUXIÈME ARTICLE	76
	RÉSUMÉ	78
	ABSTRACT	80
	INTRODUCTION	82
3.2	Site à l'étude	84
3.3	Matériel et méthodes	85
3.3.1	Matériel	86
3.3.2	Méthodes.....	87
3.3.2.1	Géoréférence et jumelage des photographies aériennes.....	87
3.3.2.2	Estimation de l'erreur totale.....	88
3.3.2.3	Analyse des photographies aériennes par stéréophotogrammétrie numérique	89
3.3.2.4	Calcul des superficies d'érosion des berges, de ravinement et de migration des cours d'eau	91
3.3.2.5	Application de l'erreur estimée aux polygones d'érosion et d'accumulation	92
3.3.2.6	Calcul des volumes et du tonnage d'érosion et d'accrétion	93
3.4	Résultats.....	94
3.4.1	Quantification et spatialisation de l'érosion des berges et de la migration des cours d'eau	94
3.5	Discussion.....	97
3.5.1	Érosion des berges, ravinement et migration des cours d'eau	97
3.5.2	Bilan sédimentaire du bassin versant	99
3.5.3	Comparaison des résultats avec ceux de d'autres études	100
3.5.4	Facteurs qui influencent l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau	103
	CONCLUSION	104

REMERCIEMENTS.....	105
RÉFÉRENCES.....	106
ANNEXE A.....	119

LISTE DES FIGURES

1.1	Matière en suspension dans la rivière des Envies. Comparaison amont-aval.	4
1.2	Bassin versant de la rivière des Envies, Québec (Canada).....	5
1.3	Comparaison entre l'erreur de vectorisation des systèmes 2-D et 3-D.	26
1.4	Bilan sédimentaire par sous-bassin. Sédiments érodés ou accumulés entre 1975 et 1997 (tonnes par année).....	27
2.1	The Des Envies River catchment, southwest Quebec (Canada).....	70
2.2	Plot of the Des Envies River width in 1975 and 1997 at 113 cross-sections.	71
2.3	Lateral channel change between 1975 and 1997 along the Des Envies River.	71
2.4	The relation between the erosion polygon depth derived from a DEM and a stereophotogrammetric system.	72
2.5	Extraction of z-values for each vector node from the DEM.....	73
3.1	Bassin versant de la rivière des Envies, Québec (Canada).....	111
3.2	Bilan sédimentaire par sous-bassins. Sédiments érodés ou accumulés entre 1975 et 1997 (tonnes par année).....	112

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Données météorologiques historiques de Shawinigan.	6
1.2	Données météorologiques historiques de Lac aux Sables.	6
1.3	Données météorologiques historiques de Saint-Joseph-de-Mékinac.	7
1.4	Principaux cours d'eau et lacs du bassin versant de la rivière des Envies.	8
1.5	Nombre de photographies aériennes et de points utilisés dans le projet.	25
2.1	Number of aerial photographys and points used in the project.	74
2.2	Root mean square errors (RMSE) for the check points of the geo-corrected aerial photographs.....	74
2.3	Summary of streambank erosion, gullyng and lateral channel change.	75
3.1	Caractéristiques physiographiques des sous-bassins de la rivière des Envies.....	113
3.2	Nombre de photographies aériennes et de point utilisés dans le projet.....	114
3.3	La racine carrée de la moyenne du carré des résidus des points d'évaluation (RMSE).....	114
3.4	Masse volumique selon la classe texturale.	115
3.5	Sommaire de l'érosion des berges.	116
3.6	Sommaire de la migration des cours d'eau.....	117

CHAPITRE 1

RÉSUMÉ

INTRODUCTION

Les berges constituent des réservoirs du patrimoine génétique en raison de la diversité des espèces qu'on y retrouve et en tant que refuge pour des espèces rares ou en voie de disparaître. Au Québec, près de la moitié des plantes menacées ou vulnérables sont associées aux milieux humides et riverains. La végétation de ces milieux joue un rôle important dans le maintien de la qualité de l'eau. Lorsque l'écoulement est lent, elle filtre et fixe les éléments nutritifs et certains éléments toxiques présents dans l'eau, contribuant ainsi à l'assainissement de l'eau au même titre qu'une usine d'épuration (BAPE, 2000). Malgré une superficie généralement faible, la végétation des bandes riveraines est très efficace pour retenir les matières en suspension et les nutriments, prévenant ainsi des apports néfastes importants aux cours d'eau (Brunet et Astin, 2000). Cependant, les aménagements effectués sur les 25 000 km de cours d'eau du Québec continuent sans cesse d'augmenter la charge sédimentaire et de dégrader les écosystèmes aquatiques des bassins versants situés plus en aval par des apports de phosphore et d'azote (BAPE, 2000) qui ne sont pas captés et retenus par la végétation riparienne.

L'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau sont des processus complexes qui provoquent une réduction de la végétation et de la faune des habitats riverains, en plus d'être la cause de pertes de sol pour les propriétaires riverains. Ces processus ont des conséquences majeures lorsqu'il s'agit de planifier des aménagements permettant d'en réduire l'impact. Comme plusieurs recherches le suggèrent, les programmes de restauration des cours d'eau peuvent augmenter la stabilité de ceux-ci et amener une réduction significative de l'érosion des berges et de la concentration des matières en suspension dans les cours d'eau (Kronvang et al., 1999; McKergow et al., 2003).

Afin de mesurer l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau, plusieurs méthodes sont applicables en fonction de l'échelle spatiale et temporelle désirée (voir Lawler, 1993). Toutefois, beaucoup de ces méthodes permettent d'effectuer des mesures sur de petites portions de territoire ce qui ne répond pas aux besoins de

projet à plus petite échelle (échelle meso) comme celle du bassin versant (Chandler, 1999). Cependant, les développements des technologies liées à l'informatique ont permis l'amélioration et la simplification des méthodes de mesures de la photogrammétrie (Baily et al., 2003). Ainsi, il est désormais possible d'utiliser simplement des systèmes de stéréophotogrammétrie très performants pour la visualisation d'images en 3-D et la mesure des processus désirés (PCI Geomatics, 2001; 2003).

1.1 Problématique

Dans le bassin versant de la rivière des Envies, l'érosion des berges se manifeste en plusieurs endroits, ce qui suggère que ce phénomène interviendrait pour une portion importante de la problématique environnementale du bassin, tant par l'apport de sédiments que de nutriments. Les coupes forestières, l'accès des animaux aux cours d'eau, le déboisement et la mise en culture des bandes riveraines seraient les causes premières de ce phénomène. L'utilisation de pesticides, le ruissellement de déjections animales mal entreposées et la non-conformité de plusieurs fosses septiques seraient des facteurs ayant également un impact sur la qualité de l'eau dans le bassin versant de la rivière des Envies. La détérioration de la qualité des eaux se reflète en aval du bassin par des concentrations élevées de matières en suspension (Figure 1.1) et des teneurs parfois élevées en phosphore, nitrates, coliformes fécaux et chlorophylle *a*. En outre, le déboisement et la mise en culture des bandes riveraines ont rendu les berges plus vulnérables, augmentant les risques d'érosion et diminuant ainsi la capacité de filtration des sédiments et des nutriments par la végétation riparienne.

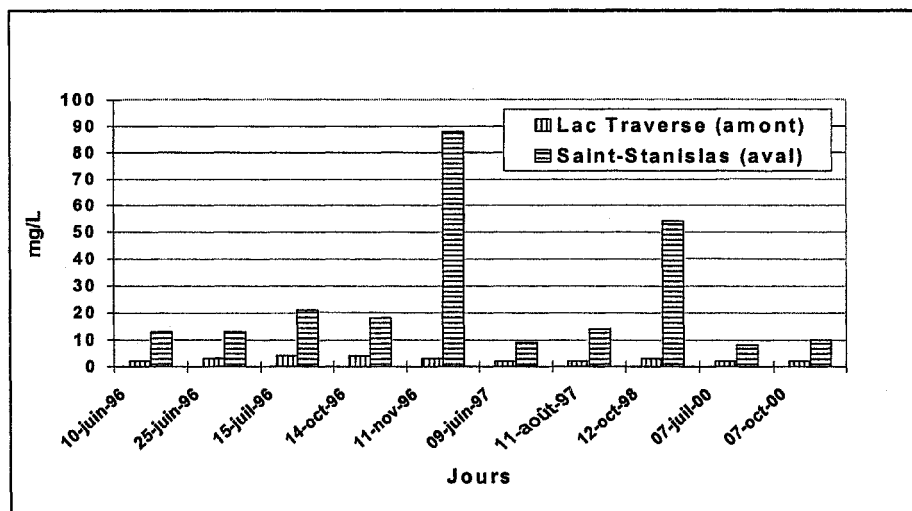


Figure 1.1 : Matière en suspension dans la rivière des Envies. Comparaison amont-aval.

1.2 Site à l'étude

Pour ce projet de recherche, le site à l'étude est le bassin versant de la rivière des Envies (Figure 1.2). Il s'agit d'un sous-bassin de la rivière Batiscan. Il est situé sur la rive nord du Saint-Laurent, à environ 40 km au nord de Trois-Rivières et à environ 100 km à l'ouest de Québec. Il est bordé au nord et à l'ouest par le bassin versant de la rivière Saint-Maurice et par celui de la rivière Batiscan à l'Est. Il s'agit du sous-bassin de la rivière Batiscan qui compte la plus grande concentration d'entreprises agricoles; de sa superficie totale de 482 km², environ 100 km² sont utilisés par le milieu agricole et ce, principalement par des exploitations laitières de petite et de moyenne taille.

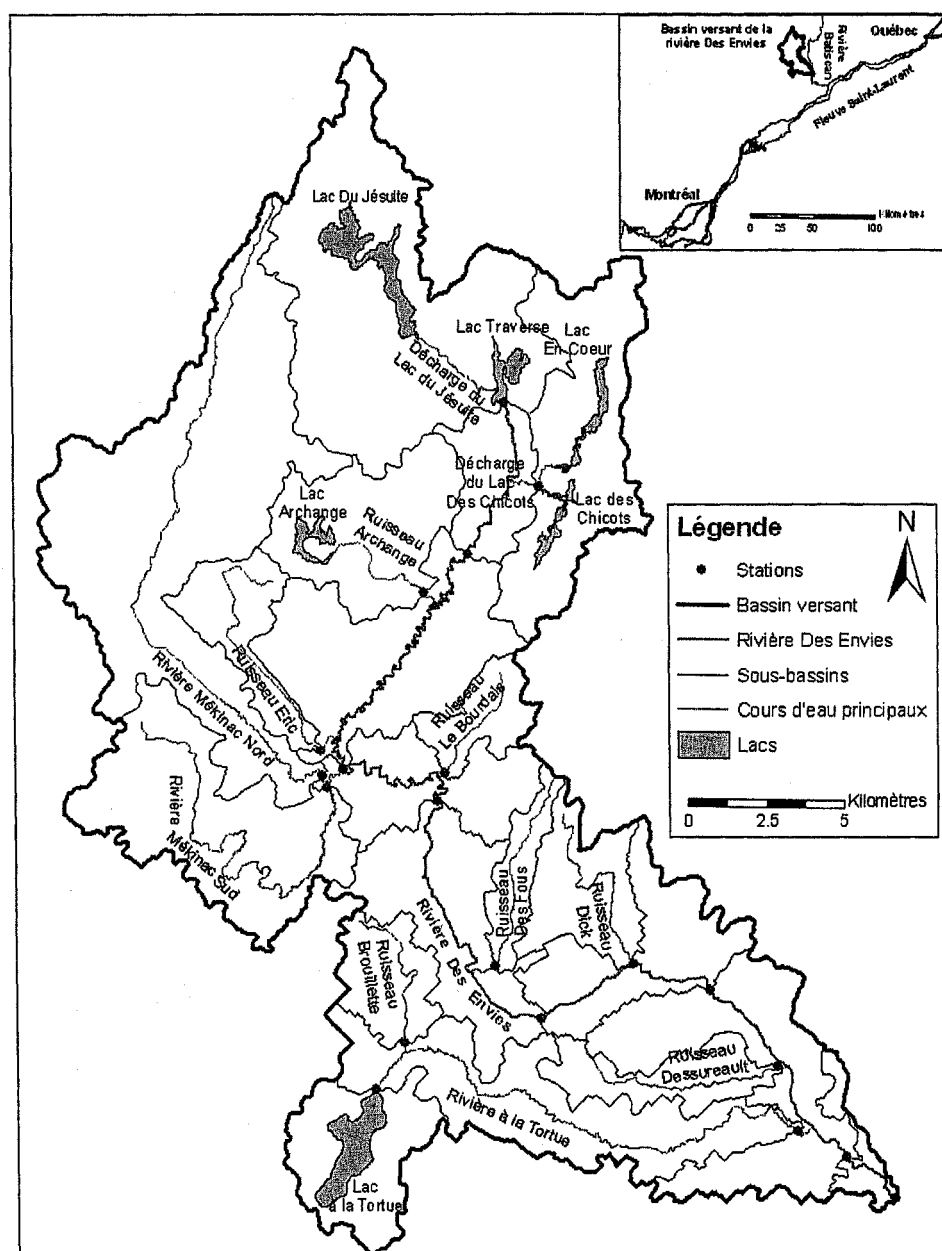


Figure 1.2 : Bassin versant de la rivière des Envies, Québec (Canada).

1.2.1 Climat

Le bassin versant de la rivière des Envies est caractérisé par une dégradation progressive des conditions climatiques des basses-terres du Saint-Laurent vers les Laurentides méridionales en fonction de l'augmentation (quoique légère) de l'altitude. Le climat y est continental subhumide subpolaire (Litynski, 1988). D'après les données de trois

stations météorologiques en périphérie du territoire à l'étude (Tableaux 1.1 à 1.3), les températures estivales varient entre 11,2°C et 25,4°C en juillet alors qu'elles passent de -23,3°C à -8°C en janvier. Au niveau des précipitations, le territoire reçoit entre 1012,2 mm et 1138,8 mm de pluie et de neige annuellement.

Tableau 1.1 : Données météorologiques historiques de Shawinigan.

Températures	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
Moy quotidien (°C)	-13,2	-10,6	-4,0	4,2	12,0	17,1	19,6	18,3	12,9	6,8	-0,4	-8,7	4,5
Écart type	2,8	2,4	2,2	1,5	1,5	1,0	1,0	1,2	1,1	1,4	1,5	3,1	11,8
Max quotidien (°C)	-8,0	-5,2	1,1	9,3	18,1	22,8	25,1	23,6	17,8	11,1	3,1	-4,3	9,6
Min quotidien (°C)	-18,3	-16,0	-9,2	-0,9	5,8	11,3	14,1	13,0	8,0	2,5	-4,0	-13,1	-0,6
Précipitations													
Pluie (mm)	17,7	15,0	34,5	67,7	97,1	101,6	107,6	103,0	99,3	91,9	58,5	25,6	819,4
Neige (cm)	61,1	45,2	39,0	13,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	24,0	65,4	249,1
Précipitation (mm)	78,9	60,1	73,5	81,1	97,6	101,6	107,6	103,0	99,3	92,5	82,5	91,0	1068,6

Source : Environnement Canada

Tableau 1.2 : Données météorologiques historiques de Lac aux Sables.

Températures	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
Moy quotidien (°C)	-14,2	-11,8	-5,1	3,3	11,2	16,4	18,8	17,5	12,0	5,9	-1,3	-10,0	3,6
Écart type	2,8	2,9	2,3	1,7	1,7	1,2	1,0	1,3	1,2	1,5	1,5	3,2	11,9
Max quotidien (°C)	-8,1	-5,3	1,1	8,8	17,9	22,8	25,0	23,6	17,7	10,7	2,6	-5,1	9,3
Min quotidien (°C)	-20,2	-18,4	-11,2	-2,3	4,4	10,0	12,5	11,3	6,4	1,0	-5,1	-14,8	-2,2
Précipitations													
Pluie (mm)	17,5	11,6	39,1	63,3	100,2	115,3	126,4	116,0	105,4	96,5	64,0	23,4	878,7
Neige (cm)	59,3	52,8	40,1	11,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	2,1	29,6	64,6	260,2
Précipitation (mm)	76,7	64,5	79,3	74,3	100,7	115,3	126,4	116,0	105,5	98,6	93,6	88,0	1138,8

Source : Environnement Canada

Tableau 1.3 : Données météorologiques historiques de Saint-Joseph-de-Mékinac.

Températures	janv.	fév.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	année
Moy quotidien (°C)	-15,8	-13,0	-5,7	3,5	10,6	15,4	18,3	17,3	11,5	5,4	-1,5	-11,6	2,9
Écart type	3,2	3,2	2,5	1,6	1,4	1,1	1,0	1,4	1,2	1,3	1,5	3,6	12,2
Max quotidien (°C)	-8,2	-4,7	1,9	10,0	18,3	22,7	25,4	24,0	17,9	11,0	3,0	-5,3	9,7
Min quotidien (°C)	-23,3	-21,2	-13,2	-3,0	2,8	8,1	11,2	10,5	5,1	-0,3	-6,1	-17,8	-3,9
Précipitations													
Pluie (mm)	14,7	8,6	31,9	66,7	93,4	99,4	108,0	95,1	97,6	81,7	51,7	20,7	769,5
Neige (cm)	56,3	48,0	34,8	14,7	0,5	0,0	0,0	0,0	0,4	2,1	25,1	60,9	242,7
Précipitation (mm)	71,1	56,7	66,7	81,3	93,9	99,4	108,0	95,1	97,9	83,7	76,8	81,6	1012,2

Source : Environnement Canada

1.2.2 Hydrographie

La rivière des Envies prend sa source au lac Traverse (à Sainte-Thècle) à une élévation de 150 m et parcourt environ 70 km avant d'atteindre la rivière Batiscan à Saint-Stanislas (à une altitude de 100 m). Son réseau hydrographique est formé de plusieurs rivières et ruisseaux et de quelques lacs importants (Tableau 1.4). Parmi ceux-ci, notons le lac de tête du bassin versant soit le lac du Jésuite (Figure 1.2). Il se déverse dans le lac Traverse via sa propre décharge. Aussi, la rivière des Envies compte de nombreux tributaires dont les rivières à la Tortue, Mékinac-Nord et Mékinac-Sud et la décharge du lac des Chicots.

Deux formes distinctes caractérisent la rivière des Envies dans son parcours vers son embouchure. Entre sa source au lac Traverse et la municipalité de Saint-Tite, son écoulement se fait dans une large vallée (500 à 1000 m) située entre le bouclier canadien et les basses-terres du Saint-Laurent. Dans cette vallée mitoyenne, la rivière des Envies s'écoule au pied du bouclier canadien et est caractérisée par une suite de méandres (Figure 1.2), un écoulement lent (voire presque nul), des talus peu élevés et de faibles pentes. Ce secteur de la rivière se retrouve à la fois en milieu agricole et forestier. Quelques tributaires en provenance du bouclier canadien viennent alimenter son écoulement ce qui engendre, lors de la fonte des neiges au printemps, une période

d'inondation prolongée. Par contre, un fois la municipalité de Saint-Tite traversée, son écoulement se modifie et son chenal devient rectiligne (Figure 1.2) et encaissé. Dans cette portion de rivière la hauteur des talus est élevée et les pentes sont fortes. Quelques rapides y affectent son cours, notamment dans la municipalité de Saint-Séverin-de-Proulxville. Cette section de la rivière circule dans les basses-terres où quelques tributaires viennent l'alimenter. Ceux-ci proviennent des terres agricoles avoisinantes et sont caractérisés par un fort ravinement.

Tableau 1.4 : Principaux cours d'eau et lacs du bassin versant de la rivière des Envies.

<i>Cours d'eau</i>	<i>Lacs</i>
- Rivière à la Tortue	- Lac à la Tortue
- Ruisseau Dessureault	- Lac Roberge
- Ruisseau Dick	- Second Lac Roberge
- Ruisseau des Fous	- Lac Éric
- Ruisseau Brouillette	- Lac Pierre-Paul
- Ruisseau le Bourdais	- Lac à la Perchaude
- Rivière Mékinac-Sud	- Lac Archange
- Rivière Mékinac-Nord	- Lac des Chicots
- Ruisseau Éric	- Lac Croche
- Ruisseau Archange	- Lac Traverse
- Décharge du lac des Chicots	- Lac du Jésuite

1.2.3 Géologie, dépôts de surface et sols

Le territoire à l'étude chevauche deux des trois grandes provinces géologiques du sud du Québec. En premier lieu, la partie nord-est du bassin versant se situe dans la province de Grenville (les Laurentides) qui est incluse dans le bouclier canadien. Cette province géologique correspond aux racines d'un puissant massif de montagne mis en place il y a plus d'un milliard d'années, mais fortement érodé depuis. Elle est faite d'assemblages de collines, de plateaux, de dépressions et de quelques massifs plus élevés. L'assise

géologique est constituée de roches intrusives très métamorphisées (gneiss) recouverte de dépôts glaciaires minces. Ceux-ci recouvrent la plus grande partie du territoire des Laurentides méridionales; ils sont associés à des affleurements rocheux au sommet de collines et de massifs. La majorité des fonds de vallée sont comblés par des dépôts de sable et de gravier, parfois épais. On retrouve aussi de nombreuses tourbières, souvent de petite taille (Li et Ducruc, 1999). Dans le bassin versant de la rivière des Envies, cette province est composée principalement de granite, de paragneiss et de quartz.

En deuxième lieu, au sud des Laurentides, est sise la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent. Ce contact géologique est souvent souligné par des failles dans lesquelles les cours d'eau peuvent circuler, comme c'est d'ailleurs le cas de la rivière des Envies entre Sainte-Thècle et Saint-Tite. La Province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent forme une vaste plaine localement interrompue par des collines dont l'altitude est généralement inférieure à 150 m. Ces basses-terres reposent sur une plateforme de roches sédimentaires composées de dépôts marins (Mer de Champlain), de dépôts glaciaires ainsi que de tourbières (Li et Ducruc, 1999).

Les dépôts de surface correspondent au matériel meuble au-dessus du socle rocheux. Ce matériel est de composition et d'épaisseur variable; c'est à partir de celui-ci que se sont mis en place les sols du Québec. En l'absence de dépôts de surface, c'est le roc qui affleure. Dans la partie des basses-terres du Saint-Laurent les dépôts d'argile et de limons marins de la Mer de Champlain dominant (Li et Ducruc, 1999). Les sols du bassin agricole sont constitués d'argiles marines associées à un relief relativement plat et de sables deltaïques associés à un relief légèrement ondulé au pied du bouclier. Des alluvions et des dépôts morainiques viennent compléter la majorité des sols cultivables du bassin versant.

1.2.4 Végétation

La végétation du territoire se subdivise en deux domaines climaciques, l'érablière à bouleau jaune et l'érablière à tilleul qui sont des étapes de dégradation végétative habituellement observée, au Québec, dans une progression nord-sud. Au Nord, on retrouve l'érablière à bouleau jaune qui est composée principalement de l'érable à sucre (*Acer saccharum*), du bouleau jaune (*Betula lutea*) et du hêtre (*Fagus grandifolia*). Au sud, c'est l'érablière à tilleul qui règne. Ce domaine est typiquement composé d'une forêt feuillue dominée par l'érable à sucre (*Acer saccharum*) qui est accompagné du tilleul (*Tilia americana*), du hêtre (*Fagus grandifolia*), de l'ostryer (*Ostrya virginiana*) et du frêne blanc (*Fraxinus americana*). Selon les conditions de sol et de drainage, d'autres essences peuvent venir s'ajouter à cette liste.

1.2.5 Utilisation du territoire

Dans le bassin versant de la rivière des Envies, la forêt est l'occupation dominante. Selon les données du recensement de Statistique Canada de 2001 (incluant le recensement agricole), celle-ci occupe une superficie de 350 km², soit 72 % du territoire à l'étude. De cette superficie, les coupes forestières récentes couvrent un territoire d'environ 33 km² (7 % du territoire) majoritairement situé dans le bouclier canadien.

L'agriculture occupe 19 % (93 km²) de la superficie totale du bassin versant. Principalement située dans les basses-terres du Saint-Laurent, cette activité, centrée sur les productions animales (94 % de bovins et de veaux), reflète l'importance de l'industrie laitière et de l'élevage bovin ainsi que la dominance des cultures traditionnelles telles que la culture fourragère (38 km²), la production céréalière (27 km²), la culture du maïs-grain (9 km²); le reste étant occupé par les prairies et les pâturages (12 km²). Les pratiques agricoles sont dominées par les labours d'automne et la fertilisation est centrée sur l'utilisation des engrais de ferme (fumiers) avec des ajouts d'engrais chimiques. Le recours aux herbicides se pratique sur des superficies équivalentes aux applications de fumiers et d'engrais chimiques (30 km²).

1.2.6 Population

Le milieu urbain couvre environ 7 km², soit moins de 2 % du territoire à l'étude. Il est caractérisé par la ville de Saint-Tite et de quelques villages épars dans le bassin versant. Aussi, de nombreuses résidences (permanentes et secondaires) sont situées autour des quelques lacs importants du territoire (lac du Jésuite, lac Traverse, lac des Chicots et lac à la Tortue). À ce titre, le lac à la Tortue est celui qui compte le plus grand nombre de résidences désormais permanentes.

La population du bassin versant est peu élevée. Environ 12 000 habitants se partagent ce territoire de près de 500 km² soit une densité de 24 habitants au kilomètre carré. D'après Statistique Canada, la population des municipalités du territoire à l'étude est de 3 845 habitants à Saint-Tite, 2 513 habitants à Sainte-Thècle, 1 275 habitants à Hérouxville et 925 habitants à Saint-Séverin-de-Proulxville. Le reste de la population se retrouve à Saint-Stanislas (1 076) et Shawinigan (secteur du Lac-à-la-Tortue) où on compte 3 039 habitants.

1.3 Revue de littérature

1.3.1 Processus d'érosion

L'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau sont des processus qui engendrent des changements dans la morphologie des cours d'eau. En plus d'être une source d'apports sédimentaires (Odgaard, 1987; Walling, 1988) et de nutriments aux cours d'eau (Laubel et al., 2000), ils contribuent à la détérioration des habitats riverains (perte d'habitats de qualité) et des habitats aquatiques (ensablement des frayères) du milieu récepteur (Hébert et Légaré, 2000).

1.3.1.1 Érosion des berges

Il est possible de définir les principaux processus en cause lorsque l'on parle de l'érosion des berges (Thorne, 1982; Lawler, 1992). D'après Thorne (1982), les processus qui causent l'érosion des berges se divisent en deux groupes: les processus fluviaux et les

processus de météorisation. D'une part, les processus fluviaux sont liés à l'écoulement de l'eau dans les cours d'eau. Celle-ci arrache des particules de sol directement à partir de la berge alors que les processus de météorisation sont liés aux conditions climatiques qui réduisent la cohésion des particules et la stabilité des rives et facilitent ainsi l'action des processus fluviaux.

Les processus fluviaux se divisent en deux groupes soient les décrochements et les glissements. Les décrochements surviennent généralement suite à l'affouillement de matériel non-cohésif situé à la base des rives. Dans ce cas, l'érosion hydrique est dominante et la stabilité des rives est indépendante de leur hauteur. Bien que les glissements puissent prendre plus d'une forme (superficiel, sur surface plane ou concave), ils sont habituellement causés par l'action concertée de différents processus et constituants tels que les facteurs climatiques (sécheresse, fortes précipitations, gel-dégel), la présence de matériaux cohésifs ainsi que la hauteur et la pente de la rive.

Parmi les événements importants en terme de quantité de matériel érodé provenant des berges, certains se regroupent sous la dénomination de mouvements de masse. Selon Coque (1998), les mouvements de masse affectent d'un seul coup des volumes de plusieurs centaines, voire des milliers de m^3 , dans des écroulements ou des glissements de terrain. La rupture du matériel peut provoquer le déplacement d'une partie d'un versant sous l'effet de la gravité. À ce titre, les glissements sont un bon exemple de mouvements de masse. Ils consistent en une descente massive et relativement rapide de matériaux le long d'un versant. Comme dans tous les mouvements de masse, le déplacement de matière s'effectue le long de surfaces de glissement facilitant l'intervention de la gravité. Dans les masses sédimentaires, cette surface coïncide régulièrement avec un plan de stratification parallèle au versant. Par contre, la surface de glissement ne correspond pas toujours à des particularités structurales. Le déplacement peut s'effectuer sur un soubassement argileux ou marneux saturé d'eau. Suite à ce genre de glissement, le versant présente généralement un profil incurvé et concave.

Par ailleurs, certains processus spécifiques surviennent au printemps en raison du couvert de glace qui devient morcelé et se fragmente, formant des radeaux de glace qui dérivent avec le courant de la rivière. Ce couvert de glace, en se soulevant, arrache et transporte des tonnes de sédiments auxquels il s'est soudé au cours de l'hiver. De même, le raclage et le décapage du lit fluvial et des berges, par les blocs et les cailloux fixés à la banquise fluviale, ou poussés par les glaces en mouvement ou par radeaux glaciaux entraînés par le courant, contribuent au nettoyage des matériaux provenant des talus riverains, à l'enfoncement du lit fluvial et au recul des versants (Saint-Laurent et Guimont, 1999).

Bien que les processus en cause au niveau de l'érosion des berges aient fait l'objet de nombreuses études (Hooke, 1979; Thorne, 1982; Lawler, 1987), il est difficile d'en déterminer les processus dominants dans la littérature. Selon Lawler (1992), la taille des cours d'eau et leur localisation dans le bassin versant (amont versus aval) en serait la cause. Ainsi, les processus liés à la météorisation seraient en cause dans l'érosion des berges des cours d'eau de l'amont des bassins versants (cours d'eau de petites tailles) alors que l'arrachement de particules via l'écoulement de l'eau dans le cours d'eau serait mis en cause dans la portion intermédiaire des bassins versants (cours d'eau de taille moyenne). Pour leur part, les mouvements de masse agiraient plus spécifiquement dans la portion aval des bassins versants là où les cours d'eau sont de plus grandes tailles.

Afin d'assurer leur stabilité, la cohésion des matériaux des berges doit être suffisante pour résister à l'érosion hydrique et aux mouvements de masse. Comme l'ont mentionné Winterbottom et Gilvear (2000), le facteur le plus important de l'érosion des berges est leur composition même. Par exemple, les berges constituées de matériaux à la fois cohésifs et non-cohésifs (limon, sable et gravier) et celles entièrement constituées de matériaux non-cohésifs (gravier) subissent le plus d'érosion alors que celles constituées de matériel laminaire cohésif (comme les argiles) subissent le moins d'érosion. Toutefois, Saint-Laurent et Guimont (1999) ont constaté, en Jamésie, que certains types de berges sont généralement plus touchés par l'érosion fluviale que d'autres, notamment les berges aux pentes abruptes constituées de matériaux argileux ou limono-argileux.

Aussi, dans une étude portant sur le réservoir Baskatong, Saint-Laurent et al. (2001) ont remarqué que la hauteur du talus est un élément important à considérer pour déterminer le taux d'érosion de ces berges. Ainsi, lors d'événements d'éboulement et d'effondrement majeur, la quantité de matériel déplacé est plus importante que pour les berges ayant une pente plus faible, spécialement lorsque les dépôts sont constitués de matériel sableux, granulaire et non-cohésif.

L'écoulement des cours d'eau a tendance à éroder plus efficacement le matériel non-végétalisé situé sous la limite des racines au pied des berges, ce qui entraîne le sapement puis l'arrachement, le décrochement et l'éboulement des terrasses préalablement formées. Par contre, les racines de la végétation peuvent fournir une bonne force de liaison aux berges. Généralement, plus la végétation est dense et complète autour de la berge, plus elle est efficace pour réduire l'érosion. Selon Beeson et Doyle (1995), les berges non végétalisées ont cinq fois plus de chances de subir une érosion notable que les berges végétalisées. Pour Odgaard (1987), les risques d'érosion sont environ deux fois plus faibles pour les berges flanquées d'arbres matures. Bien que dans certains cas la végétation riparienne puisse réduire la stabilité des rives (Simon et Collison, 2002), la plupart des études montrent l'efficacité de cette végétation pour la prévention de l'érosion des berges (Abernethy et Rutherford, 2000a; Abernethy et Rutherford, 2000b; Simon et Collison, 2002). À ce titre, dans l'étude de Beeson et Doyle (1995), les berges semi-végétalisées ont subi une érosion qui se situe entre les deux autres types de berges (végétalisées et non-végétalisées).

1.3.1.2 Ravinement

Le ravinement est un processus d'érosion avancé de l'érosion en rigoles; il est donc consécutif à la formation de celles-ci. Une rigole est une dépression du sol suffisamment petite pour pouvoir être supprimée par des méthodes culturales telles que les labours et le chisel. La formation des rigoles provient de la concentration du ruissellement de surface causé par une saturation en eau du sol résultant de fortes précipitations (Bryan et al., 1998). L'érosion des sols tend à augmenter du haut de la pente vers le bas principalement parce qu'il y a une plus grande concentration de l'écoulement de surface

(formation de rigoles) ce qui augmente la vitesse de l'eau et sa capacité d'arrachement des particules du sol par l'eau chargée de sédiments (Fox et Bryant, 1999). Cependant, l'influence de l'inclinaison de la pente et de sa longueur sur la capacité d'arrachement des particules diffère selon la durée et l'intensité des événements climatiques (Bryan et al., 1998). D'autre part, la présence de végétation au sol permet de diminuer la capacité de l'eau à éroder le sol lorsqu'il y a formation de rigoles d'érosion (Cerdan et al., 2002).

Suite au développement de rigoles peu profondes, le ruissellement de surface se concentre dans des chenaux d'écoulement puis il y a creusage du lit d'écoulement en fonction de la vitesse de l'écoulement et des précipitations. Les rigoles se transforment ensuite en ravins lorsque leur profondeur empêche leur nivellement par de simples instruments aratoires. L'approfondissement typique des ravins de cet ordre se fait du bas de la pente vers le haut de celle-ci (érosion régressive). Ce type d'érosion peut entraîner dans les cours d'eau des sédiments de la couche arable ainsi que de couches plus profondes du sol. En plus de son impact au niveau de l'érosion de surface, ce processus de dégradation des sols est souvent une source d'érosion au niveau des rives par le creusage de nouveaux chenaux qui se déversent dans les cours d'eau. C'est d'ailleurs ce qui a été évalué dans cette étude.

Bien que quelques modèles d'érosion des sols dérivés de l'équation universelle de perte de sol USLE (Universal Soil Loss Equation) tiennent compte de ce type d'érosion (Wischmeier et Smith, 1978), la reconnaissance du ravinement comme une classe d'érosion spécifique est plutôt récente (Foster, 1986; Nachtergaele et Poesen, 1999). Actuellement, les études portant sur l'érosion du sol arable causée par les précipitations et le ruissellement de surface tentent de déterminer quelle est la contribution du ravinement (Poesen et al., 1998) en termes d'apports de sédiments aux cours d'eau. Ces études permettront éventuellement d'améliorer les prédictions des modèles d'érosion par le développement de nouvelles équations pour calculer la contribution du ravinement au budget sédimentaire des bassins versants (Cerdan et al., 2002).

1.3.1.3 Migration des cours d'eau

La morphologie des cours d'eau et des plaines inondables se développe par une suite de processus associés à l'écoulement de l'eau et la quantité de sédiments qu'elle transporte, à la migration des cours d'eau, à l'érosion et la déposition de sédiments dans les plaines inondables ainsi qu'au transport et à la déposition de débris ligneux (Ham et Church, 2000; O'Connor et al., 2003). Les patrons de migration des méandres démontrent bien les capacités hydrauliques des forces de cisaillement pour éroder les berges et le matériel des plaines inondables qui est ensuite entraîné via l'écoulement de surface et les mouvements de masse vers les cours d'eau (Micheli et Kirchner, 2002a). Ainsi, l'érosion et les processus de transport déplacent vers l'aval des cours d'eau les sédiments qui s'étaient préalablement déposés au niveau des berges et des plaines inondables en amont. D'après Ham et Church (2000), c'est d'ailleurs le déplacement de ces sédiments qui cause des changements dans la morphologie des chenaux.

Aussi, l'augmentation des forces hydrauliques des cours d'eau ou l'augmentation de l'érodabilité des rives peuvent augmenter les taux d'érosion et de migration des cours d'eau (Howard, 1984). Certaines études montrent que le déboisement des rives des cours d'eau méandrés peut entraîner une accélération des taux de migration et de l'érodabilité des berges (Micheli et Kirchner, 2004). D'ailleurs, les taux d'érosion des rives végétalisées sont inférieurs à ceux des rives non-végétalisées ou partiellement végétalisées (Odgaard, 1987; Beeson et Doyle, 1995; Abernethy et Rutherford, 2000a; Abernethy et Rutherford, 2000b; Simon et Collison, 2001; Micheli et Kirchner, 2002a; Micheli et Kirchner, 2002b). En outre, si la résistance et la rugosité des rives causées par la présence de végétation riparienne atténuent les effets érosifs des variations de vitesse provenant de la présence de méandres, le déboisement des rives peut mener, dans le temps, à des chenaux moins sinueux (Micheli et Kirchner, 2004).

Des chenaux de rivières dynamiques sont nécessaires pour maintenir les écosystèmes riverains en santé. Cependant, en l'absence d'une bonne planification de l'utilisation du

sol, la migration des méandres des cours d'eau peut menacer les plaines inondables agricoles et résidentielles (Micheli et Kirchner, 2004).

1.3.2 Apports sédimentaires aux cours d'eau

D'après Odgaard (1987), l'érosion des berges est une source significative de la charge sédimentaire de plusieurs cours d'eau au même titre que les sédiments en provenance des terres avoisinantes entraînés par le ruissellement de surface. Ces matières en suspension, entraînées vers les cours d'eau récepteurs, peuvent causer une abrasion des branchies et affecter la respiration des poissons. Elles peuvent également, lorsqu'elles se déposent au fond, colmater le lit des ruisseaux et priver ainsi d'apport en oxygène les œufs des poissons. Une hausse des matières en suspension est généralement accompagnée d'une hausse de la turbidité, ce qui rend le traitement de l'eau pour fins d'approvisionnement en eau potable plus complexe et plus coûteux. Une telle hausse peut aussi entraîner un réchauffement de l'eau, lequel aura pour effet de réduire la qualité de l'habitat pour les organismes d'eau froide.

1.3.3 Impacts sur la faune et la flore

L'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau, tout comme les coupes forestières, l'accès des animaux aux cours d'eau ainsi que la mise en culture et le déboisement des bandes riveraines ont un impact sur la qualité des habitats riverains. Ces habitats, sont à la base d'une chaîne alimentaire qui supporte une grande variété de poissons, d'amphibiens, de reptiles, d'oiseaux et de mammifères qui en dépendent à un moment ou un autre de leur cycle de vie. De plus, ces habitats représentent un intérêt écologique primordial puisqu'ils sont parmi les plus productifs de la planète. D'ailleurs, au Québec, on y retrouve environ 40 % des espèces de plantes présentes. La détérioration des rives a donc un impact significatif sur l'équilibre écologique et la biodiversité, notamment par la destruction des habitats essentiels pour la faune et la flore.

1.3.4 Méthodes de mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau

Plusieurs méthodes sont disponibles pour mesurer l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau en fonction de la résolution temporelle et spatiale désirée. Lawler (1993) estime que les méthodes utilisant la sédimentologie (50-15 000 ans), les évidences botaniques (50-100 ans) et la comparaison de données historiques (jusqu'à 150 ans) servent surtout pour des comparaisons à long terme et pour des superficies aussi vastes que le fond d'une vallée. À ce titre, les photographies aériennes sont très utilisées pour analyser les modifications subies par les cours d'eau dans le dernier siècle (Gurnell, 1997; Ham et Church, 2000; Micheli et Kirchner, 2002a; O'Connor et al., 2003). Les méthodes telles que les relevés planimétriques et la délimitation de la section transversale permettent pour leur part d'observer les modifications subies par les cours d'eau à moyen terme (1-30 ans). Pour des mesures à court terme (1 semaine à 5 ans), Lawler (1993) suggère l'utilisation de jalons de mesures de l'érosion des berges ou la photogrammétrie terrestre.

Bien que les échelles spatiales et temporelles des analyses diffèrent grandement, l'utilisation de la photogrammétrie terrestre a beaucoup bénéficié des développements de la photogrammétrie en général. Selon Mikhail et Bethel (2001), la photogrammétrie était traditionnellement définie comme l'action que pose l'être humain pour dériver des informations à l'aide de mesures visuelles effectuées sur la photographie d'un objet (la photo-interprétation). Cette méthode, désormais considérée comme la photogrammétrie analytique, a beaucoup évolué grâce au développement de l'informatique ce qui a permis l'avènement de la photogrammétrie numérique (Lane et al., 2000). Cette méthode, qui est basée sur l'utilisation de matériel de base numérique ou numérisé à partir de photographies papier permet d'utiliser des méthodes automatisées pour dériver les informations désirées (Chandler, 1999; Lane, 2000). À titre d'exemple, il est maintenant possible de générer automatiquement des modèles numériques d'élévation (MNE) comme source tri-dimensionnelle de la forme des cours d'eau (Winterbottom & Gilvear, 1997), comme source de données topographiques (Lane, 2000; Lane et al.,

2003) ou pour estimer des volumes d'érosion et d'accumulation dans les cours d'eau grâce à des MNE de différence (Lane et al., 2003).

La photogrammétrie était auparavant utilisée par des spécialistes de la discipline. Avec l'arrivée sur le marché d'ordinateurs possédant beaucoup de mémoire-disque, de logiciels bon marché et d'innovations récentes en photogrammétrie (comme les systèmes de stéréophotogrammétrie numérique), des chercheurs de plusieurs disciplines utilisent maintenant la photogrammétrie plus facilement. D'ailleurs, l'utilisation des photographies aériennes et des systèmes d'information géographique (SIG) pour la mesure des processus géomorphologiques comme l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau s'est répandue (voir Lawler, 1993; Gurnell, 1997; Nachtergaele et Poesen, 1999; Winterbottom et Gilvear, 2000; Micheli et Kirchner, 2002a).

Pour l'utilisation des photographies aériennes comme support à la mesure de l'érosion des berges, du ravinement ou de la migration des cours d'eau, plusieurs méthodes d'interprétation peuvent être utilisées pour évaluer les pertes de sols (Lawler, 1993). Alors que certains auteurs préfèrent mesurer la migration des cours d'eau en identifiant le centre de celui-ci (Micheli et Kirchner, 2002a), les limites latérales du cours d'eau (Winterbottom et Gilvear, 2000) ou les limites latérales entre le cours d'eau et les arbres riverains (Gurnell, 1997) d'autres chercheurs (Harmel et al., 1999; Saint-Laurent et al., 2001) ont choisi de localiser le haut de la crête des berges de cours d'eau ou de réservoirs afin de quantifier les pertes dues à l'érosion. D'autre part, pour les mesures de ravinement, les photographies aériennes sont utilisées en concomitance avec des relevés de terrain pour mesurer des changements à court terme suite à des événements pluviaux importants (Poesen et al., 1998; Nachtergaele et Poesen, 1999).

Dans tous les cas, deux groupes de photographies aériennes d'un même territoire, d'une même échelle et représentant deux années différentes sont nécessaires. Pour faciliter l'analyse, elles peuvent être numérisées individuellement ou regroupées pour former une orthophoto spatialement rectifiée. Ainsi, les photographies sont intégrées à un SIG qui

permet de tracer, dans un environnement numérique, la position du centre du cours d'eau ou des crêtes de berges. Dans ce même SIG, les vecteurs tracés sont superposés, ce qui permet la création de polygones de perte ou d'accumulation de sol. À partir de ces polygones, des calculs de superficies et de volumes érodés peuvent être effectués (Ham et Church, 2000). L'utilisation d'un SIG permet ainsi de conserver en format numérique les données de modifications historiques des cours d'eau et des secteurs de ravinement.

1.3.5 Limitations des différentes méthodes de mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau

D'après Lawler (1993), la comparaison des résultats d'études utilisant des méthodes différentes est très complexe principalement parce que les méthodologies utilisées diffèrent grandement au niveau technique ainsi qu'au niveau des échelles spatiale et temporelle. Il est tout de même possible de déterminer les avantages et les inconvénients attribués aux différentes méthodes compatibles avec les mesures de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau.

Selon Lawler (1993), les méthodes telles que les relevés planimétriques et la délimitation de la section transversale sont très efficaces pour la mesure de l'érosion des berges et de la migration des cours d'eau. Cependant, les deux méthodes ne permettent pas de couvrir un vaste territoire et dans le cas de mesures de la section transversale, si les mesures ne sont pas suffisamment rapprochées elles peuvent donner des informations incomplètes au niveau de la modification tri-dimensionnelle de la morphologie des cours d'eau et des changements morphologiques qui les affectent (Westaway et al., 2003). De plus, pour que les résultats obtenus grâce à ces deux méthodes soient concluants, il est nécessaire que plusieurs relevés soient effectués au même endroit, ce qui nécessite un investissement en temps important lorsque le territoire à l'étude est vaste. Il en est de même en ce qui concerne les méthodes pour le court terme (1 semaine à 5 ans), que se soit l'utilisation de jalons de mesures de l'érosion des berges ou la photogrammétrie terrestre. Les deux méthodes sont très précises (de l'ordre du millimètre pour les jalons et du centimètre pour la photogrammétrie terrestre) mais leur utilisation se limite à des

portion de cours d'eau afin d'y mesurer l'érosion des berges et la migration des cours d'eau plutôt que le ravinement (Lawler, 1993). Aussi, elles demandent beaucoup de travail de terrain pour des analyses sur un territoire très restreint qui va de quelques mètres à environ cent mètres de rives (Lawler, 1993; Chandler, 1999; Laubel et al., 2000). De plus, les mesures effectuées avec des jalons nécessitent un contact direct avec la berge à l'étude, ce qui n'est toutefois pas le cas avec la photogrammétrie terrestre (Barker et al., 1997).

1.3.6 Avantages de la stéréophotogrammétrie numérique pour la mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau

Une fois les limites technologiques contournées, les méthodes de télédétection telles que la photogrammétrie permettent d'éviter les contraintes spatiales et temporelles qui sont généralement associées aux relevés terrestres traditionnels. Ainsi, l'utilisation de ces méthodes permet d'obtenir des données spatiales de haute résolution, distribuées et cartographiques (Westaway et al., 2003). De plus, le fait que la photogrammétrie soit applicable pour représenter la surface terrestre et détecter des changements morphologiques aux échelles micro, meso et macro (Chandler, 1999) est un avantage de la photogrammétrie sur les autres méthodes traditionnelles de mesures de l'érosion des berges (voir Lawler, 1993).

D'autre part, l'utilisation d'un système de stéréophotogrammétrie numérique (visualisation 3-D) pour des mesures planimétriques offre de nombreux avantages vis-à-vis de la méthodologie traditionnelle nécessitant l'utilisation d'un système de visualisation 2-D. Par exemple, avec la méthodologie traditionnelle, la position de la berge et le niveau de l'eau sont localisés et numérisés sur des orthophotos visualisées en 2-D à l'aide d'un SIG (Gurnell, 1997; Downward et al., 1994; Winterbottom et Gilvear, 2000). Parfois, la différence de teinte de gris des pixels de l'image est utilisée afin de distinguer le cours d'eau comme tel de la berge (Mount et al., 2003). Un système de stéréophotogrammétrie numérique permet la visualisation en 3-D des images ce qui simplifie l'identification des objets, leur mesure et l'enregistrement de coordonnées

précises pour ceux-ci puis la collecte planimétrique de vecteurs de bonne qualité (PCI Geomatics, 2001; 2003).

Lors de l'utilisation des techniques traditionnelles d'analyse des photographies aériennes (système 2-D), les objets présents dans l'image tendent à s'étirer à partir du centre de l'image vers les marges latérales de celle-ci. Ce phénomène est bien connu sous le nom de déplacement radial. Ainsi, si un objet est numérisé à partir d'une image visualisée en 2-D (même les images ortho-rectifiées), les coordonnées en x et en y seront décalées de leur véritable position dû justement au déplacement radial. En numérisant des objets à l'aide d'un système de visualisation 3-D, les yeux de l'opérateur vont compenser pour le déplacement radial (Mikhail et Bethel, 2001). En fait, dans cette situation, le cerveau humain va corriger automatiquement les effets du déplacement radial en interprétant la parallaxe afin de permettre à l'opérateur de percevoir la troisième dimension de l'image (Mikhail et Bethel, 2001; PCI Geomatics, 2001; 2003). Ainsi, des mesures planimétriques (coordonnées x et y) et d'élévation (coordonnées en z) de bonne qualité pourront être récoltées (PCI Geomatics, 2001; 2003). À ce titre, le Chapitre 1 du présent document présente une comparaison de la précision des mesures effectuées à l'aide des deux systèmes. De plus, comme le système de stéréophotogrammétrie numérique est récent et qu'il a été utilisé exclusivement pour la collecte de données d'altitude (courbes de niveau, points de contrôle, etc.), une méthodologie d'application pour la mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau y est proposée. Enfin, comme aucune étude n'ayant mis à profit les avantages indéniables de la stéréophotogrammétrie numérique n'a été recensée à ce jour, il nous a été impossible de comparer nos résultats avec d'autres études utilisant des techniques d'analyses similaires.

1.4 Objectifs de recherche

L'**objectif général** du projet est de développer une méthodologie d'application d'un système de stéréophotogrammétrie numérique pour la mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau et de l'utiliser pour spatialiser et quantifier ces processus à l'intérieur de la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies.

Les **objectifs spécifiques** sont les suivants :

1. Développer une méthodologie d'application d'un système de stéréophotogrammétrie numérique pour la mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau;
2. Estimer l'erreur inhérente à l'utilisation d'une telle méthode;
3. Spatialiser et quantifier l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau dans le bassin versant;
4. Appliquer l'erreur aux mesures effectuées;
5. Comparer l'erreur estimée à celle d'un système de photogrammétrie traditionnelle;
6. Calculer les volumes de sédiments érodés et accumulés et effectuer un bilan sédimentaire partiel;
7. Comparer les résultats par sous-bassins.

1.5 Méthodologie

Les mesures ont été effectuées dans le secteur agricole du bassin versant de la rivière des Envies, soit un territoire de 93 km² avec 684 km de cours d'eau. Un système de stéréophotogrammétrie numérique (PCI Geomatics, 2001; 2003) a été utilisé pour quantifier et spatialiser l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau non-rectifiés à partir de photographies aériennes noir et blanc numérisées (échelle 1: 15 000) de 1975 et de 1997. Les années 1975 et 1997 ont été sélectionnées en raison de la disponibilité et de la qualité des photographies aériennes.

Les photographies aériennes numérisées ont été analysées à l'aide du module *OrthoEngine* du logiciel *Geomatica* (PCI Geomatics, 2001, 2003). Afin de quantifier

l'érosion des berges, les crêtes de celles-ci (les talus) ont été localisées et vectorisées sur les photographies aériennes de 1975. Ensuite, ces vecteurs ont été importés et visualisés sur les photographies aériennes de 1997 où toutes les modifications de la position des talus ont été numérisées à l'aide de nouveaux vecteurs. Pour leur part, les limites latérales des cours d'eau ont été vectorisées séparément pour les deux années à l'étude. Dans les deux cas, les vecteurs des deux années ont été superposés avec un SIG afin de créer soit des polygones d'érosion ou des polygones d'accumulation là où des changements ont eu lieu (Odgaard, 1987; Lawler, 1993; Micheli et Kirchner 2002a). À partir de ces couches de polygones nouvellement créés, les taux de recul ou de migration (m), les superficies (m^2), les volumes (m^3) et le tonnage annuel (érosion et accumulation) ont été calculés.

Le système de stéréophotogrammétrie numérique a été choisi puisqu'il permet de numériser et d'enregistrer, à l'aide de vecteurs planimétriques de qualité, les coordonnées précises des objets visibles sur les images (PCI Geomatics, 2001; 2003). Il permet également la vectorisation à l'écran et le transfert vers un SIG pour l'analyse quantitative des vecteurs. Tout comme Gurnell (1997), quelques stratégies ont été adoptées pour réduire les sources d'erreur et faciliter la comparaison de l'information extraite à partir de photographies aériennes de différentes dates du territoire à l'étude: (a) les photographies utilisées étaient de même échelle; (b) le même opérateur a effectué toutes les interprétations; (c) un groupe de points de contrôle standard a été utilisé pour géo-référencer les photographies aériennes à la même base; (d) une définition standard d'une berge a été utilisée (Mount et al., 2003).

Des points de contrôle au sol (une vingtaine par photographie) et des points de jonction (une dizaine par duo de photographies) ont servi pour géo-référencer et jumeler les paires de photographies aériennes à partir des fichiers au 1 : 20 000 de la Base de Données Topographiques du Québec (BDTQ) de 1996 (voir le tableau 1.5).

Tableau 1.5 : Nombre de photographies aériennes et de points utilisés dans le projet.

Année	Photographies aériennes	Points de contrôle au sol	Points de jonction	Points d'évaluation
1975	134	1462	1473	695
1997	147	1537	1213	651

D'après Mount et al. (2003), dans les études nécessitant des comparaisons image à image et des mesures de mouvements historiques des cours d'eau (déplacements latéraux), si les erreurs d'enregistrement et de mesures ne sont pas identifiées, il devient difficile de déterminer si un changement mesuré au niveau des cours d'eau est le fait d'une erreur dans le processus de mesure ou d'un changement véritable. Ainsi, l'erreur totale a été évaluée en additionnant les résultats des deux sources d'erreurs potentielles: l'erreur d'enregistrement (soit l'erreur de numérisation et l'erreur de géo-référence) et l'erreur de vectorisation (Downward et al., 1994). Elle a été estimée à 0,70 m pour les deux années à l'étude. Cette estimation de l'erreur a été appliqué à tous nos polygones afin d'estimer les superficies minimum et maximum d'érosion et d'accumulation pour chaque polygone.

Des estimations de perte sédimentaire ont été effectuées par la multiplication (par polygones) des superficies érodées par les valeurs d'altitude maximale et minimale présentes dans ces polygones d'érosion et d'accumulation. Les valeurs d'altitude ont été extraites de MNE générés à partir des photographies aériennes des deux années à l'étude. Enfin, pour évaluer le potentiel du système de stéréophotogrammétrie numérique, une comparaison de l'erreur de vectorisation a été effectuée avec une technique traditionnelle d'analyse de photographies aériennes.

1.6 Résultats

D'une part, les résultats de notre évaluation du potentiel du système de stéréophotogrammétrie numérique (Figure 1.3) montrent que ce système permet d'obtenir une erreur de vectorisation plus faible (moyenne de 0,33 m contre 0,44 m), ce

qui indique que le système de visualisation 3-D permet de mesurer et d'enregistrer des coordonnées plus précises pour des objets dans l'image qu'avec une technique traditionnelle d'analyse de photographies aériennes.

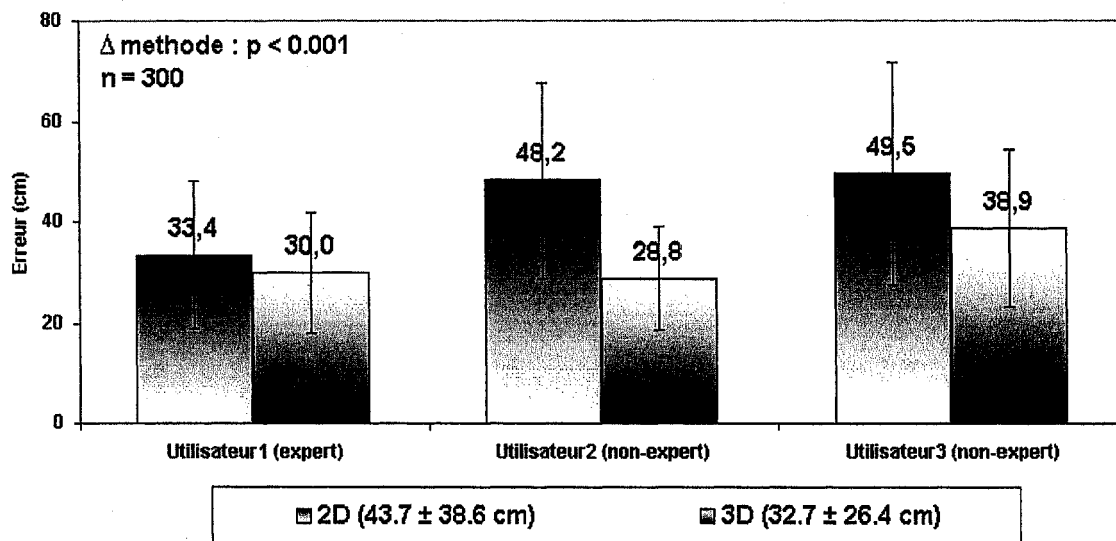


Figure 1.3 : Comparaison entre l'erreur de vectorisation des systèmes 2-D et 3-D.

D'autre part, le bilan sédimentaire du bassin versant, qui tient compte de la perte de sédiments par érosion des berges et migration des cours d'eau, et du gain par accumulation de sédiments dans les cours d'eau, montre qu'au total le bassin versant perd 12 454 tonnes de sédiments par année (Figure 1.4). De ce total, la portion de la rivière des Envies située dans les basses-terres compte pour 76 % des sédiments érodés bien qu'une large part des sédiments se soit accumulée dans ce secteur (67 % des sédiments accumulés).

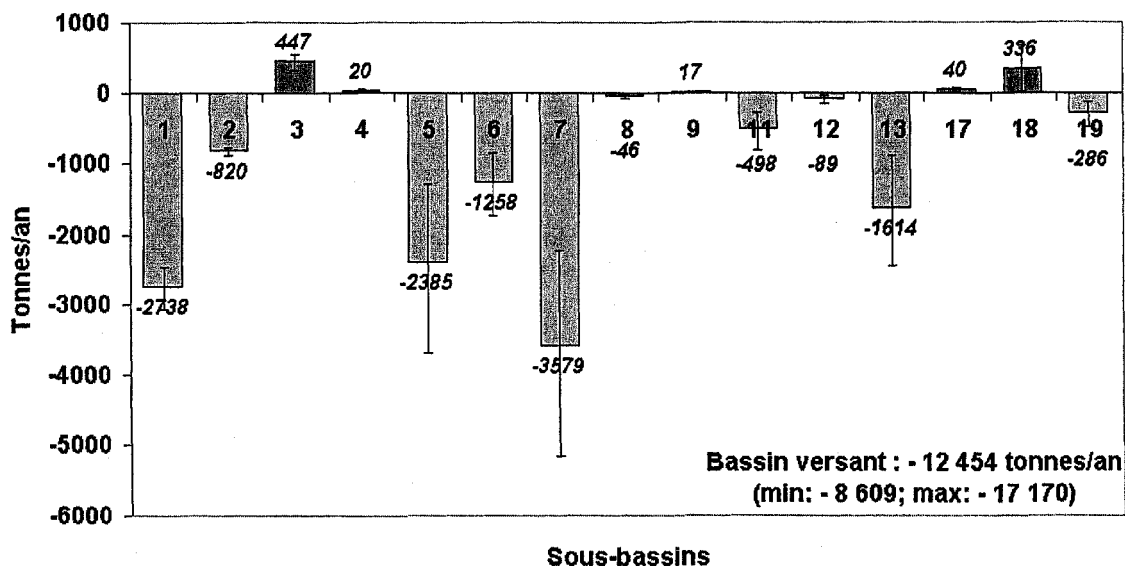


Figure 1.4 : Bilan sédimentaire par sous-bassin. Sédiments érodés ou accumulés entre 1975 et 1997 (tonnes par année).

CONCLUSION

Malgré la lourdeur des procédures de préparation des photographies aériennes, la précision des données obtenues avec la stéréophotogrammétrie numérique et la rapidité du système pour réaliser un projet d'une telle envergure ont justifié, dans notre cas, l'utilisation de cette méthode pour spatialiser et quantifier l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau d'un territoire aussi vaste (93 km²). Ainsi, l'utilisation de cette méthode a diminué le temps de travail (puisque'elle permet la vectorisation à l'écran et le transfert vers un SIG) et le coût des mesures *in-situ*, ce qui est souvent, pour des études d'érosion des berges, un facteur limitant incontournable. Désormais, tout est en place pour que soient réalisés des travaux de réhabilitation des cours d'eau du bassin versant de la rivière des Envies, dont le suivi pourra ultérieurement être effectué grâce à la stéréophotogrammétrie numérique. Pour s'assurer de l'efficacité de cette méthode d'avant-garde, celle-ci devrait être testée dans d'autres

sites où l'érosion des berges et la migration des cours d'eau sont des problèmes d'envergure.

Bien que nos résultats pour la migration des cours d'eau montrent que l'accumulation est plus importante que l'érosion (de l'ordre de 24 %), le bilan sédimentaire du bassin versant est négatif. Une répartition spatiale des processus géomorphologiques en cause ainsi qu'une contribution importante de l'érosion des berges et du ravinement dans les basses-terres expliquent cet état de fait. Cependant, ce bilan ne tient pas compte des pertes par érosion des sols. D'ailleurs, l'érosion des berges est une source significative de la charge sédimentaire de plusieurs cours d'eau au même titre que les sédiments en provenance des terres avoisinantes entraînés pour leur part via le ruissellement de surface (Odgaard, 1987). Pour compléter le bilan entamé dans le cadre de cette étude et dégager la part respective de l'érosion des sols et de l'érosion des berges dans le bilan sédimentaire du bassin versant, celui-ci sera comparé ultérieurement à la charge sédimentaire des cours d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

Abernethy, B., Rutherford, I.D., 2000a. The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 25: 921-938.

Abernethy, B., Rutherford, I.D., 2000b. Does the weight of riparian trees destabilize riverbanks?, *Regulated Rivers: Research and Management* 16: 565-576.

Baily, B., Collier, P., Farres, P., Inkpen, R., Pearson, A., 2003. Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 28: 307-320.

Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 22: 1217-1227.

Beeson, C.E., Doyle, P.F., 1995. Comparison of bank erosion at vegetated and non-vegetated channel bends, *Water Resources Bulletin*, 31: 983-990.

Brunet, R.-C., Astin, K.B., 2000. A 12-month sediment and nutrient budget in a floodplain reach of the river Adour, southwest France, *Regulated Rivers: Research and Management*, 16: 267-277.

Bryan, R.B., Hawke, R.M., Rockwell, D.L., 1998. The influence of subsurface moisture on rill system evolution, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 23: 773-789.

Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2000. L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Tome II, Rapport n° 142, Québec, 286 p.

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P., Lecomte, V., 2002. Sediment concentration in interrill flow : interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 27: 193-205.

Chandler, J., 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 24: 51-63.

Coque, R., 1998. *Géomorphologie*, Armand Colin éditeur, 6^e édition, 502 p.

Downward, S.R., Gurnell, A.M., Brookes, A., 1994. A methodology for quantifying river channel planform change using GIS *In* Variability in Stream and Sediment Transport. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, Canberra, December.

Foster, G.R., 1986. Understanding ephemeral gully erosion *In* National Research Council, Board on Agriculture, Soil Conservation, Assessing the National Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, Report No. 10.

Fox, D.M., Bryan, R.B., 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient, *Catena*, 38: 211-222.

Gurnell, A.M., 1997. Channel change on the river Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs, *Regulated Rivers: Research and Management*, 13: 13-26.

Ham, D.G., Church, M., 2000. Bed-material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, British Columbia, *Earth Surface, Processes and Landforms*, 25: 1123-1142.

Harmel, R.D., Haan, C.T. Dutnell, R., 1999. Bank erosion and riparian vegetation influences: Upper Illinois river, Oklahoma, *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 42 (5): 1321-1329.

Hébert, S., Légaré, S., 2000. Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, envirodoc n° ENV-2000-0487, rapport n° QE-121, 24 p. et 3 annexes.

- Hooke, J. M., 1979. An analysis of the processes of river bank erosion, *Journal of Hydrology*, 42: 39-62.
- Howard, A., 1984. Sufficient conditions for river meandering: a simulation approach, *Water Resources Research*, 20: 1659-1667.
- Kronvang, B., Svendsen, L.M., Jensen, J.P., Dørge, J., 1999. Scenario analysis of nutrient management at the river basin scale, *Hydrobiologica*, 410: 207-212.
- Lane, S.N., 2000. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry, *Photogrammetric Record*, 16: 937-957.
- Lane, S.N., James, T.D., Crowell, M.D., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research, *Photogrammetric Record*, 16: 793-821.
- Lane, S.N., Westaway, R.M., Hicks, D.M., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing, *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 28: 249-271.
- Laubel, A.R., Kronvang, B., Larsen, S.E., Pedersen, M.L., Svendsen, L.M., 2000. Bank erosion as a source of sediment and phosphorous delivery to small Danish streams *In* Role of Erosion and Sediment Transport and Contaminant Transfer, Proceedings of a symposium held at Waterloo, Canada, July 2000. IAHS Publ. No. 263, pp. 75-82.
- Lawler, D.M., 1987. Bank erosion and frost action: an example from South Wales *In* International Geomorphology 1986 I, Gardiner, V., éditeur, Wiley, pp. 575-590.
- Lawler, D.M., 1992. Process dominance in bank erosion systems *In* Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives. Carling, P.A., Petts, G.E., éditeurs, Wiley, pp. 117-143.

Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review, *Earth Surface, Processes and Landforms*, 18: 777-821.

Li, T., Ducruc, J.-P., 1999. Les provinces naturelles. Niveau I du cadre écologique de référence du Québec, Ministère de l'Environnement, 90 p.

Litynski, J., 1988. Carte des climats du Québec.

McKergow, L.A., Weaver, D.M., Prosser, I.P., Grayson, R.B., Reed, A.E.G., 2003. Before and after riparian management: Sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment, Western Australia, *Journal of Hydrology*, 270: 253-272.

Micheli, E.R., Kirchner, J.W., 2002a. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 1. Remote sensing measurements of streambank migration and erodibility, *Earth Surface, Processes and Landforms*, 27: 627-639.

Micheli, E.R., Kirchner, J.W., 2002b. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 2. Measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics, *Earth Surface, Processes and Landforms*, 27: 687-697.

Micheli, E.R., Kirchner, J.W., 2004. Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, central Sacramento River, California, USA, *River Research and Application*, 20: 537-548.

Mount, N.J., Louis, J., Teeuw, R.M., Zukowskyj, P.M., Stott, T., 2003. Estimation of error in bankfull width comparisons from temporally sequenced raw and corrected aerial photographs, *Geomorphology*, 56: 65-77.

Nachtergaele, J., Poesen, J., 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs, *Earth Surface, Processes and Landforms*, 24: 693-706.

O'Connor, J.E., Jones, M.A., Haluska, T.L., 2003. Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA, *Geomorphology*, 51: 31-59.

Odgaard, A.J., 1987. Streambank erosion along two rivers in Iowa, *Water Resources Research*, 23: 1225-1236.

PCI Geomatics., 2001. OrthoEngine Reference Manual, 184 p.

PCI Geomatics., 2003. OrthoEngine User Guide, 158 p.

Poesen, J., 1998. Gully erosion: importance and model implications *In* Modeling Soil Erosion by Water. Proceedings of a symposium held in Berlin. NATO-ASI Series, I-55, 269-296.

Saint-Laurent, D., Guimont, P., 1999. Dynamique fluviale et évolution des berges du cours inférieur des rivières Nottaway, Broadback et de Rupert, en Jamésie (Québec), *Géographie physique et Quaternaire*, 53 (3): 389-399.

Saint-Laurent, D., Touileb, B. N., Saucet, J.-P., Whalen, A., Gagnon, B., Nzakimuena, T., 2001. Effects of simulated water level management on shore erosion rates. Case study: Baskatong Reservoir, Québec, Canada, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28: 482-495.

Simon, A., Collison, J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability, *Earth, Surface, Processes and Landforms* 27: 527-546.

Thorne, C.R., 1982. Processes and mechanisms of bank erosion *In* Gravel-Bed Rivers, Hey, R.D., Barthurst, J.C., Thorne, C.R., éditeurs, Wiley, pp. 295-305.

Walling, D.E., 1988. Erosion and sediment yield research – Some recent perspectives, *Journal of Hydrology*, 100 : 113-141.

Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D., 2003. Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis, *International Journal of Remote Sensing* 24: 795-815.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning, *USDA Agricultural handbook*, 537, 58 pp.

Winterbottom, S.J., Gilvear, D.J., 1997. Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography, *Regulated Rivers: Research and Management*, 13: 489-499.

Winterbottom, S.J., Gilvear, D.J., 2000. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland, *Regulated Rivers: Research and Management*, 16: 127-140.

CHAPITRE 2

PREMIER ARTICLE

STREAMBANK EROSION, GULLYING AND LATERAL CHANNEL CHANGE
MEASUREMENTS WITH A DIGITAL STEREOPHOTOGRAMMETRIC
SYSTEM

Maxime Brien¹

Pierre-André Bordeleau¹

Stéphane Campeau^{1,2}

1. Section de géographie, département des Sciences humaines, Université du Québec à Trois-Rivières, CP 500, Trois-Rivières, QC, Canada G9A 5H7
2. Corresponding address: stephane.campeau@uqtr.ca

RÉSUMÉ

Dans ce projet, une méthodologie a été développée pour l'application d'un système de stéréophotogrammétrie numérique à la spatialisation et la quantification de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies. Ce bassin versant, situé dans le Sud-Ouest du Québec (Canada), chevauche deux provinces naturelles, soit le bouclier canadien et les basses-terres du Saint-Laurent. Ce chevauchement engendre trois patrons d'écoulement différents: rectiligne dans le bouclier, encaissé dans les basses-terres et méandré dans la vallée mitoyenne. Les mesures ont été réalisées sur un intervalle de 22 ans (1975-1997) pour les basses-terres et la vallée mitoyenne. Des vecteurs géoréférencés ont été tracés à partir de photographies aériennes au 1 : 15 000 numérisées et géoréférencées afin d'identifier les talus (érosion des berges et ravinement) et les marges latérales des cours d'eau (migration des cours d'eau). Ils ont ensuite été intégrés et superposés dans un système d'information géographique (SIG) pour spatialiser et quantifier les processus à l'étude en terme de taux de recul et de migration, de superficies, de volumes et de tonnage. Afin d'évaluer le potentiel du système de stéréophotogrammétrie numérique, une comparaison de l'erreur de vectorisation a été effectuée avec une technique traditionnelle d'analyse de photographies aériennes. Trois interprètes (1 expert et 2 non-experts) ont vectorisé des crêtes de berges et des limites latérales de cours d'eau entre deux points fixes (5 sites, 30 répétitions) pour les deux années et les deux techniques. Les résultats

obtenus montrent que le système de stéréophotogrammétrie numérique permet d'obtenir une erreur de vectorisation plus faible (moyenne de 0,33 m contre 0,44 m), ce qui indique que le système de visualisation 3-D permet de mesurer et d'enregistrer des coordonnées plus précises pour des objets dans l'image qu'avec une technique traditionnelle d'analyse de photographies aériennes. Cette estimation a été appliquée aux mesures effectuées afin de fournir une marge supérieure et inférieure de l'erreur aux résultats obtenus. Malgré la lourdeur des procédures de préparation des photographies aériennes, la stéréophotogrammétrie numérique s'est avérée rapide et efficace pour spatialiser et quantifier les processus géomorphologiques à l'étude. Elle peut être appliquée à l'échelle d'un bassin versant avec une précision et des coûts intermédiaires entre les techniques aéroportées et les techniques traditionnelles d'analyse de photographies aériennes.

ABSTRACT

This study explores the application of a digital stereophotogrammetric system for the measurement of streambank erosion, gullying and lateral channel change from aerial photographs of the agricultural part (93 km²) of the Des Envies River catchment. The system was coupled with digital photogrammetric techniques for the automatic extraction of digital elevation models (DEMs) and for the evaluation and management of errors. Detailed measurements of streambank erosion, gullying and lateral channel change were completed for 684 km of streams for 1975 and 1997 within a geographic information system (GIS). Comparisons were conducted between the digitizing error generated from a 2-D and this 3-D visualization system by 3 operators. The results indicated that the 3-D system minimized digitizing errors (0.33 m versus 0.44 m). The low digitizing error also made possible to measure small size eroded features for a meso-scale study site at a small scale resolution. This study represents the first attempt to measure streambank erosion, gullying and lateral channel change with a digital stereophotogrammetric system at a watershed scale.

KEY WORDS: stereophotogrammetric system; aerial photography; streambank erosion; gullying; lateral channel change.

INTRODUCTION

Streambank erosion, gullying and lateral channel change are geomorphologic processes that drive changes in channel and land morphology through time. These processes cause a decline of riverine habitats for vegetation as well as fauna and a loss of soil and money for the riverside landowners. Furthermore, it's a source of suspended sediments to stream (with their associated nutrients) and of contaminant transfers both increasing pollution of rivers (Laubel *et al.*, 2000) and reducing the quality of aquatic ecosystems habitats. As many studies suggested, restoration programs can increase channel stability and lead to significant reduction of bank erosion and suspended sediment concentrations in stream (McKergow *et al.*, 2003; Kronvang *et al.*, 1999). Also, the advent of new techniques in agriculture will probably reduce ephemeral erosion gullies and streambank gullying impact on the agricultural fields and the adjacent streams.

The use of serial historical sources for the study of gullying and lateral channel changes that have occurred over the past 150 years has become a popular approach. Typical sources include early maps, aerial photographs, surveyor's notes and diaries. Aerial photographs are particularly valuable when considering streambank gullying and channel change over time (Lawler, 1993; Nachtergaele and Poesen, 1999). Other techniques that can be used for the measurement of these processes are: planimetric resurvey and repeated cross-profiling for intermediate timescales (1 to 30 years) and

relatively low resolution changes. For short timescales measurements (for a period extending from a few months to a few years), erosion pins (even PEEP) and terrestrial photogrammetry can detect small amounts (even millimeters) of bank retreat (see Lawler, 1993).

Historically, the practice of photogrammetry was carried out by specialists of this discipline. With the advent of high storage capacity computers, cost-effective software tools and recent improvements in digital photogrammetry (such as digital stereophotogrammetric systems), researchers from other disciplines now use photogrammetric techniques easily. Recently, the use of aerial photography with GIS for historic measurements of planimetric geomorphological processes such as streambank erosion and gullying and lateral channel changes as become common (see Lawler, 1993; Gurnell, 1997; Nachtergaele and Poesen, 1999; Winterbottom and Gilvear, 2000; Micheli and Kirchner, 2002). With the availability of fully automated digital methods, photogrammetric techniques are also used to generate DEMs as sources of three-dimensional forms of rivers (Winterbottom and Gilvear, 1997), topographic features (Lane, 2000; Lane *et al.*, 2003) and DEMs of difference for the estimation of erosion and deposition volumes in gravel-bed rivers (Lane *et al.*, 2003).

The objective of this paper is to describe the application of a digital stereophotogrammetric methodology developed for the measurement of streambank erosion, gullying and lateral channel changes over time. The specific objectives are :

(a) measuring streambank erosion, gullying and lateral channel change rates, volumes

and the total mass of material eroded; (b) evaluating the sources of errors; (c) comparing the results with other techniques and studies; (d) discussing the applicability of the method.

2.1 Study site

The Des Envies River catchment (478 km²) is an ungaged catchment of the Batiscan River watershed located half on the Canadian Shield and half on the St-Lawrence River lowlands in southwest Quebec (Figure 2.1). The Canadian Shield part is characterized by Precambrian gneiss and paragneiss rocks, lakes, straight channels, forested steep slopes, logging and country living, while the St-Lawrence River lowlands are characterized by a large plain (composed of unconsolidated glacio-lacustrine, glaciofluvial and marine sediments) where the channels are mainly sinuous and agriculture is the main activity (75 % of the territory). At the Canadian Shield piedmont, the Des Envies River (74 km long) encompasses a meandering transition zone between the upstream reaches of the Canadian Shield and the downstream channel of the St-Lawrence River lowlands. This transition zone is characterized by a large valley (500 to 1000 m) where all the Canadian Shield streams join the meandering Des Envies River and cause major floods during spring. The hydrological cycle of the catchment is characterized by melting snow during spring and low flow during summer with some episodic precipitations common to a continental subhumid subpolar climate (Litynski, 1988). The catchment receives between 850 and 1200 mm of precipitation annually which are equally distributed during summer and winter.

Twenty sampling stations (8 on the Des Envies River and 12 on tributaries) were monitored for water quality (nutrients and suspended matters) and stream discharge from 2002 to 2004. The whole catchment was subdivided in 20 sub-catchments define from each sampling station. Streambank erosion and lateral channel changes were measured in sub-catchments dominated by agricultural activities.

2.2 Measuring streambank erosion, gullyng and lateral channel change using a digital stereophotogrammetric system and a geographic information system

The application of a digital stereophotogrammetric system allows to measure and record accurate coordinates for features in the images and to collect planimetrically correct vectors (PCI Geomatics, 2001; 2003). Also, the use of a GIS-based technique to handle historical planform data allows flexibility in data analysis and a more precise estimation of the accuracy of the results (Downward *et al.*, 1994). However, the use of GIS in aerial photography analysis does not eradicate sources of error (Downward *et al.*, 1994; Gurnell, 1997).

As for Gurnell (1997), a number of strategies were adopted to maximize the comparability of the information extracted from aerial photographs of the same channel at different dates: (a) the aerial photographs used were of the same scale; (b) the same operator did all the interpretations; (c) a set of standard control points was used to register information from each set of aerial photographs on a common base

(the 1996 *Base de Données Topographiques du Québec* (BDTQ) 1:20 000 scale maps); (d) a standard definition of river bank location was used as Mount *et al.* (2003) did.

2.2.1 Preparation of aerial photographs for feature extraction and creation of the orthophotos

Black and white aerial photographs (scale 1: 15 000) of 1975 and 1997 were converted to a digital format (pixel resolution of 0.70 m) with a standard scanner set at 600 dpi (Table 2.1). 15 flight lines from each year covered the whole catchment. Each photograph covered an area that overlaps the area covered by the previous photograph by 60 %. The overlap provided coverage of the entire ground area from two viewpoints, which was necessary for stereoscopic viewing.

A set of ground control points (GCPs), tie points (TPs) and check points (CPs) extracted from the BDTQ 1: 20 000 scale maps were used for the geo-correction of the images, to relate overlapping images together and to estimate the image-to-image analysis error. According to the OrthoEngine User Guide of PCI Geomatics (2001; 2003), a GCP is a feature clearly identifiable in the raw image for which the ground coordinate are known. It is used to determine the relationship between the raw image and the ground by associating the pixels and lines in the image to the x, y, and z coordinates on the ground. A TP is a feature clearly identifiable in two or more overlapping images. It identifies how the images are related to each other and ensures

the best fit not only for the individual images, but for all the images united as a whole. CPs are GCPs that are not used to compute the math model. This model is used to correlate the pixels of the images to the correct locations on the ground accounting for known distortions. CPs provide an independent accuracy assessment of the math model. GCPs and TP were primarily placed at cross-corners of major roads that were visible on the scale maps and the aerial photographs. In the agricultural fields, secondary roads and agricultural culverts were used. The z value of the GCPs and TP came from a 5 m pixel resolution DEM generated with ArcGIS from the vector contour lines of the BDTQ. The number of points is presented in table 2.1.

To improve the quality of the stereo viewing throughout the stereopairs, epipolar images (images that have been reprojected to minimize offsets in the Y-direction relative to a reference image) were generated. These geo-corrected images were preferred to ortho-rectified images because ortho-rectification, which is the process of using a rigorous math model to correct distortions in raw images, reduces the parallax effect well known as the basis of the stereo vision system (PCI Geomatics, 2001; 2003). The parallax is the apparent shift in the position of an object due to a shift in the position of the observer himself. Orthophotos have been created for visualization and cartographic purposes only.

2.2.2 Estimating error for image-to-image analysis

According to Mount *et al.* (2003), in studies involving image-to-image comparison and measurement of historic channel change, if measurement error estimates are not quoted, it can be extremely difficult to determine whether a reported change in a channel parameter is a result of an error in the measurement processes or of a genuine change. Following this assertion, the total error was estimated as for Downward *et al.* (1994), by the addition of the results of two sources of error: the registration error (the error from the conversion to a digital format and the geo-correction of the aerial photograph to the same basis) and the digitizing error. To quantify the registration error, the RMSE of the residual easting and northing of the check points was used (see table 2.2). The RMSE is defined as:

$$r = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}}, \quad (1)$$

Where x is the mean of x_1, x_2, \dots, x_n , which are the error at n reference points. According to Winterbottom and Gilvear (2000), this value is the average amount by which co-ordinates of the same point on the two maps will deviate. In most projects, the residual errors should be one pixel or less, which is the case here (PCI Geomatics, 2001; 2003). Spatial distortion (which is influenced by the registration error) can be minimized by improving the number and quality of GCPs; however, in cases where

GCPs are limited, a significant spatial distortion may remain in the corrected or rectified image (Mount *et al.*, 2003).

The digitizing error was quantified by analyzing the variability in the digital representation of a river channel boundary as a result of repeated digitizing (Downward *et al.*, 1994). The vector representations of the channel boundaries digitized between two fixed nodes (5 sites, 30 digitizing) were overlapped separately for each year within a GIS. To estimate the average positional error of the line as a lateral displacement in m (the digitizing error) the area displacement was divided by the mean channel boundary length. The digitizing error was estimated to be 0.29 m in 1975 (standard deviation of 0.26) and 0.31 m in 1997 (standard deviation of 0.21). The total error (the average RMSE of the check points and the digitizing error of each year being added together) was estimated to be 0.70 m for both year.

2.2.3 The 3-D Feature Extraction

For the feature extraction, a Geomatica module called OrthoEngine (PCI Geomatics, 2001; 2003), a WildCat VP760 (3D labs) computer graphic card and a pair of 60GX (NuVision) shutter glasses were used. With OrthoEngine 3-D Feature Extraction, overlapping images taken from different viewpoints can be visualized in stereo to produce a 3-D representation of the ground. Using the same technique as natural human stereoscopic vision, the left and right eyes are presented with slightly different images. With this OpenGL language system, both images are displayed alternately on

the screen, and with the shutter glasses, one image is shown only to the left eye, and the other image is shown only to the right eye. Differences in the position of the feature in the two images are perceived as differences in the height of the feature (PCI Geomatics, 2001; 2003). The system also allows the user to zoom to the magnification (up to 128X) that is needed for the feature extraction.

Once a stereopair of epipolar images has been selected and loaded, the 3-D feature extraction can begin with the floating stereo cursor display on the screen. The stereo cursor is actually made of two cursors, one displayed to the left eye, and one displayed to the right eye (one for each of the aerial photographs). By adjusting the difference in x coordinate, or parallax, between the halves of the cursor, the apparent height of the cursor can be controlled by the user. In this way, the cursor can be positioned in x, y and z to extract precise coordinates (PCI Geomatics, 2001; 2003).

2.2.4 Bankfull, streambank gullying and water-level location

With the use of this stereophotogrammetric system, the streambank, the streambank gullies and the water level location were easy to identify, except in the following cases: (a) the streambank, the streambank gullies or the water level was obscured by the tree canopy; (b) the size of the stream was smaller than 2 times the pixel size (0.7 m) of the images. In the tree canopy case, the streambank, the streambank gullies and the water level location were mapped by interpolating their position between gaps of riparian trees. When the tree canopy cover was too dense to locate the streambank

location and the streambank gullies in one or both years, no digitizing and no interpolation was made. Although a lot of erosion can occur in small reaches, no digitizing was made for the reaches of less than 2 m width because as rivers decrease in activity or size, the changes in planform between historical sources become increasingly subtle (Downward *et al.*, 1994). Also, no measurement was made on man-made streams. To minimize the effects of radial displacements, the center of the aerial photograph was used for digitizing.

For streambank erosion and the streambank gullies, bankfull location and slope crests were digitized on the 1975 aerial photographs. According to Mount *et al.* (2003), for near-vertical banks, bankfull position is at the top of the bank face. Within the 3-D feature extraction, the aerial photographs of 1997 were then loaded with the vectors mapped in 1975, and every difference in the position of the bankfull location between the two years was digitized with new vectors.

For the lateral channel change, the water level location (the river stage) was mapped for the streams being more than 2 m width. The water-level line of 1975 and 1997 were digitized and compared and feature change polygons were created for the calculation of erosional and depositional changes (as for Ham and Church, 2000).

Because variations in water level (discharge) between two successive dates of photographs can lead to significant bias in sediment budget calculation (Ham and Church, 2000), the validation of the river stage (the average width of the water

surface) between different dates is imperative. Since the Des Envies River catchment is ungaged, the discharge comparison was impossible for the photo dates of 1975 and 1997 and also to compare the consequences of the water-level and the channel width. In the process, we tried to use the discharge of the Batiscan River (gauge station 50304, 3.4 km downstream of the Des Envies River mouth) because the hydrological cycle of the Batiscan River and the Des Envies River may be different (as for the watershed size and the river size) any peak discharge comparison appeared worthless. However, we decided to evaluate a possible error in water-level limits by plotting the Des Envies River width of 1975 and 1997. The river width was measured at 113 cross-sections generated from a river centerline mapped on the 1997 orthophotos. With these cross-sections vectors (spaced at 500 m), the river width was automatically extracted from the water-level vectors digitized for the lateral channel change measurements. As shown in figure 2.2, it seems that there is no constant pattern of narrowing or widening of the Des Envies River width at the water-level between 1975 and 1997 which suggests that the water levels were similar in 1975 and 1997. The points that are farther from the 1: 1 line in figure 2.2 are associated to major channel displacements. Therefore, no correction gradient was applied and no error was added to the total error.

2.2.5 Calculating streambank erosion, gullyng and lateral channel change rates

Streambank erosion and gullyng were calculated by creating eroded-area polygons from the vectors mapped on the aerial photographs of 1975 and 1997. Within ArcGIS 9.0, the vector layers were combined and automatically intersected to form polygon features from which the calculation of the average lateral rates calculation was made for the measurements of the area, the volumes and the total mass of material eroded.

As for Ham and Church (2000) and O'Connor *et al.* (2003), the lateral channel change rates was evaluate with the overlap of channel polygons (these were created for each year from the vector layers mapped) but we created an intersect layer from this overlap. As shown in figure 2.3, this intersect layer served to create eroded-area polygons (1975 polygon layer minus the intersect layer) and accretion-area polygons (1997 polygon layer minus the intersect layer). The calculation of the average lateral rates, the area, the volumes and the total mass of material eroded or deposited was made from these eroded- and accretion-area polygons.

2.2.6 Applying total error estimation to eroded- and accretion-area polygons

Error estimates should always accompany results from channel change studies based on image analysis (Mount *et al.*, 2003). However, errors were reported in different ways: as a spatial uncertainty (Micheli and Kirchner, 2002), as a confidence interval

in the width measurement (Liébault and Piégay, 2001) or as uncertainties arise from differences in flow stage, errors in transcription and errors in registration and digitizing (O'Connor *et al.*, 2003). We applied the total error estimated (registration + digitizing errors (0.7m)) to our eroded- and accretion-area polygons. For the minimum area, a new polygons layer was generated by using inside buffers. The buffer width was equal to the total error estimated and polygons with a null area were excluded (polygons with an area lower than the minimum area). For the maximum area, outside buffers were generated and the maximum area was calculated. The data of minimum, measured and maximum erosion- and accretion-area are displayed in table 2.3. The same z values (explained below) were used for the minimum, measured and maximum volumes estimations.

2.3 Calculating erosion and accretion volumes from the planimetric measurements

The use of automated digital photogrammetry to provide the necessary data for geomorphological studies is now a recognized technique (Lane *et al.*, 2000; Baily *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2003; Westaway *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2004). This technique offers several huge advantages compared with other surveying technologies and traditional photogrammetric methods (Chandler, 1999) for the measurement of river morphology and the quantifying eroded volumes. It allows the production of DEMs derived from stereo-pairs of aerial photographs using fully automated image-processing algorithms. But as many authors suggest (Chandler, 1999; Lane, 2000;

Baily *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2004), the accuracy of the output data has to be determined because the use of digital photogrammetry for the production of DEMs can lead to enormous errors.

2.3.1 DEMs automatic extraction

For this study, 15 geocoded DEMs per year were automatically extracted (one per flight lines) from stereo pairs of epipolar images with the OrthoEngine module of Geomatica 9.0 (PCI Geomatics, 2003). The use of epipolar images increases the speed of the correlation processes and reduces the possibility of incorrect matches (OrthoEngine User Guide (PCI Geomatics, 2001; 2003). The same parameters (minimum and maximum elevation, DEM details, Pixel sampling, etc.) were selected for all the DEMs extracted. Despite the fact that the OrthoEngine User Guide suggests that a full resolution DEM (Pixel Sampling of 1) for aerial photography needs a smoother DEM that represents the terrain better (low DEM Detail), high resolution DEMs were extracted to retain high precision for the pixel values in the DEM (high DEM Detail). The corresponding pixel size was 0.70 m. A mosaic of DEMs was automatically created for the entire study site and converted to a raster format (ESRI GRID). For more information about DEMs automatic extraction, see Chandler (1999), OrthoEngine User Guide (PCI Geomatics, 2001; 2003), Baily *et al.* (2003) and Westaway *et al.* (2003).

2.3.2 Comparing the error for the automatically extracted DEMs with the 3-D Feature Extraction

According to Chandler (1999) it is important to establish the required quality of any measured data, particularly the accuracy of the DEM, before carrying out any photogrammetric measurement. To assess for the accuracy and the precision of the surveyed surface (the automatically generated DEMs) the difference in elevation between surveyed and independently acquired elevation check points was used to determine the mean error (ME) and the standard deviation of error (SDE) for the surfaces (Lane *et al.*, 2000; Westaway *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2004). Because the only truly independent and quantitative means of assessing whether the DEM generation process has been accurate is to use some form of ground truth (Chandler, 1999), the DEMs error was estimated with check points extracted from the 1:20 000 topographic scale maps of the BDTQ (Table 2.1). Since the elevation information of DEMs automatically extracted from aerial photography is influenced by vegetation (the matching pixels are at the vegetation top rather than the ground surface) the evaluation of DEMs error, with any kind of check points, seems useless without any post-editing (Lane *et al.*, 2000; Westaway *et al.*, 2003). However, as the spatial coverage increases, the impact of vegetation on DEM quality increases and post-processing becomes unfeasible especially if a high spatial resolution is required (Lane *et al.*, 2000; Westaway *et al.*, 2003). Since the main objective of this study wasn't to develop a new methodology for volume calculation using DEMs but to apply an analytical stereophotogrammetric system to photo-interpretation, no post-editing was

performed on the DEMs, even though, according to Grün *et al.* (2000), some of the big blunders can easily be detected and removed by post-editing.

As mention earlier, an analytical stereophotogrammetric system like 3-D Feature Extraction allows to collect the correct planimetric position (x and y coordinates) and accurate elevations (z coordinates) of each feature (the eroded- and accretion-area polygons). It seems, therefore, more realistic to collect the accurate elevation of each polygon than making any post-editing effort to correct the entire 100 km² DEMs. When depth values extracted from the 1975 and 1997 DEMs were over 3 m for a polygon, the values were systematically derived from the aerial photography with the stereophotogrammetric system. Depth values from the DEMs of less than 3 m were validated in a random way. A comparison between depth value derived from the 1997 DEM and the stereophotogrammetric system for 384 of the 891 bank erosion and gully polygons is presented in figure 2.4. The mean difference is 1.8 m with a standard deviation of 2.8 m. These results show that it is imperative to measure the accurate elevation since DEM-derived depths are overestimated, especially for polygons deeper than about 3 m.

2.3.3 Volume and mass of eroded and accumulated sediments

Streambank erosion, gully and lateral channel change volumes (erosion and deposition) were estimated by converting areal of changes into volumes. To do so, the planimetric area was multiplied by the difference in height between the highest and

the lowest node of each polygon (the depth value). The nodes were extracted from the polygon layer database to create a new point layer from which the z-values were extracted from the mosaic of 1997 DEMs (Figure 2.5). To ensure that the depth value was a true representation of the surface and not the result of vegetation, errors or any blunders, the first and last deciles were eliminated from the database of the node height. The mass of eroded and accumulated sediments was calculated by multiplying the volume and the soil density of each polygon. Soil density was extracted by clipping the polygon layer with the soil layer (soil digital maps, Ministry of the Agriculture, Quebec Government).

The results are presented in table 2.3. The mean lateral rate of a polygon was calculated by dividing its area by its maximum length. Over the period of 22 years (from 1975 to 1997), the mean lateral rates of bank erosion and gully polygons was 0.09 m. The mean lateral rate of eroding channels was 0.14 m, while the mean lateral rate of accretion was 0.17 m. The total area eroded by streambank erosion and gully polygons was 115 009 m², which represents a volume of 314 619 m³ and a mass of 385 635 tons. Channel migration led to the erosion of 346 680 tons of sediments while 458 325 tons of sediments were deposited in accretion areas. As a result, the net storage-change of the watershed was 273 990 tons of sediments over the 22 year period, which represents an average 12 454 tons of exported sediments per year.

2.4 The 2-D and 3-D digitizing error comparison

To evaluate the potential of the stereophotogrammetric system, a digitizing error comparison with a 2-D aerial photography analysis technique was conducted. Channel boundaries and streambank were digitized, by 3 operators (1 expert and 2 non-experts), between two fixed nodes (5 sites, 30 digitizing) for both years and techniques. The results showed that with the stereophotogrammetric system we obtain lower digitizing errors (mean of 0.33 m versus 0.44 m, $p < 0,001$) which demonstrated that the 3-D visualization system allows to measure and record more accurate coordinates for features in the images than the traditional aerial photography analysis techniques. Furthermore, a standard deviation comparison (0.30 m versus 0.40 m) show that the variability in 2-D digitizing is superior than the one from the stereophotogrammetric system which means that the digitizing error can be up to 0.63 m with the 3-D system whether than 0.84 m with the traditional 2-D system. If we add the 2-D digitizing error to the registration error to estimate and compare the total error generated by both techniques, we obtain a total error of 0.90 m for the 2-D while we get 0.70 m for the 3-D system.

DISCUSSION

This paper has shown the potential of a digital stereophotogrammetric system for the measurement of streambank erosion, gullying and lateral channel change at the catchment scale. The use of a 3-D visualization system for planimetric measurements offers numerous advantages over traditional methodologies of 2-D visualization systems. As an example, with the traditional methodologies, the bank position and the water level are located and digitized on orthophotos visualized in 2-D with a GIS (Gurnell, 1997; Downward *et al.*, 1994; Winterbottom and Gilvear, 2000). Furthermore, the difference in greyscale values of juxtaposed pixels is sometimes used to separate the reaches from the banks (Mount *et al.*, 2003). A digital stereophotogrammetric system offers a 3-D visualization of the images that makes it easy to recognize features, to measure and record accurate coordinates for the features and to collect planimetrically correct vectors (PCI Geomatics, 2001; 2003).

Moreover, in aerial photography analysis, the objects with height appear to lean away from the center of the image. This is commonly referred to as relief displacement. If a feature is digitized from the image (even an ortho-rectified image), the x and y coordinates will be offset from their true positions because of relief displacement. By digitizing features with the 3-D visualization system, the eyes of the operator will compensate for the relief displacement. In fact, the human brain automatically corrects the geometric effects of sensor geometry and relief displacement (the brain

interprets the parallax or retinal disparity in a manner that allows to perceive one 3-D image) (Mikhail and Bethel, 2001; PCI Geomatics, 2001; 2003). As a result, the correct planimetric position (x and y coordinates) and accurate elevations (z coordinates) are collected for the features (PCI Geomatics, 2001; 2003). The comparison between the digitizing error from the traditional 2-D methodology and the stereophotogrammetric methodology showed that the digitizing error is 25 % less for the stereophotogrammetric methodology. By comparing the digitizing error of our study with an other study of the same kind by Downward *et al.* (1994), the digitizing error generated by the stereophotogrammetric system is about 7 times less (between 6.5 and 7.4) for a scale of 1: 15 000 compared to scales of 1: 10 000 and 1:10 560. If we change scale from 1: 10 000 to 1: 15 000 this difference becomes more significant (between 9.75 and 11.1times less).

The main problem we had to deal with in this study was the precision in the height value of the DEMs generated from stereo pairs of aerial photographs. To generate those DEMs, OrthoEngine uses the image correlation to extract matching pixels in the two images and then uses the sensor geometry from the computed math model to calculate x, y, and z positions. The use of DEMs automatically derived can suffer from the influence of image matching algorithms. According to Daniel and Tennant (2001), when DEMs are generated by autocorrelation, the image-matching algorithm will exert systematic influences on the derived DEMs. Moreover, Grün *et al.* (2000) have shown that the performance of matching algorithms is image scale-dependent and the z bias of automatically derived DEMs (generated with three different image-

matching algorithms of three different digital photogrammetric workstations) is always positive (which was our case). This means that, in the average, the matched heights are floating over the reference heights. To avoid this precision problem, we used another advantage of the digital stereophotogrammetric system to extracted intervals in the z-values directly from the sources of the heights values which is the aerial photographs themselves. When z-values of the DEMs were disproportionably high because of the vegetation apparent on the aerial photographs (> 3 m height interval) or too low because of error in the automatic DEMs extraction, the height intervals were directly extracted by interpretation with OrthoEngine 3-D Feature Extraction. This was possible because moving the floating cursor up or down is a result of changing the relative offset, or parallax, between the left and right half of the cursor. This way, the cursor was positioned not only in x and y, but also in z (PCI Geomatics, 2001; 2003).

At the beginning of this study, we attempted to calculate volumes by using the cut/fill function of ArcGIS 9.0 by comparing a polygon raster and the DEMs generated from aerial photographs. To do so, all the eroded- and accretion-polygons were converted into a raster format as follows: the polygons were converted into 3-D features; the 3-D features were converted into TIN's (it is possible because the z value of a node digitized with OrthoEngine 3-D Feature Extraction is implicitly included in the database of the layer); and the TIN's were converted into rasters. However, as for Grün et al., (2000), the DEMs derived from the aerial photographs had a positive z bias (1.38 m) compared with photogrammetrically acquired points of the 1:20 000

BDTQ contour lines scale maps, many of the volumes calculated were therefore considered as 'NET GAIN' instead of 'NET LOSS'. The error of the automatically generated DEMs was too high (regarding the precision required for the volume calculation) to be used with the cut/fill function of ArcGIS 9.0. To obtain precision in elevation values of less than 0.25 m, an airborne laser altimetry survey of the entire study would have been required. An airborne laser altimetry survey coupled with a set of aerial photographs and high precision check points (geodesic points) to correct the blunders would be a solution to improve precision. However, this method is quite expensive and still requires a manually post-editing step for the evaluation and correction of vegetation height.

In study involving aerial photography for the measurement of streambank erosion, gullying and lateral channel change, there is a constant trade-off in system design between decreasing the image scale, which increases spatial coverage but reduces theoretical precision, or increasing image scale, which increases theoretical precision but also increases the number of images that must be obtained (Westaway et al., 2003). The fact that photogrammetry is applicable for landform representation and detecting morphological change in the micro-, meso- and macro-scales (Chandler, 1999) is one of the advantages of photogrammetry over other erosion calculation techniques (see Lawler, 1993). At a micro-scale, the monitoring of streambank erosion and gullying with erosion pins or cross-profile surveying involves intensive fieldwork and these methods have several limitations: firstly, they involve interference with the bank face being measured; and secondly, the spatial resolution is

limited to the points under investigation. Photogrammetry reduces spatial sampling problems and enables bank erosion to be monitored with minimal [or no] contact on the bank face itself (Barker *et al.*, 1997). Recent research have also demonstrated that close range digital photogrammetry can produce high quality and high-density data to quantify geomorphological processes (Chandler, 1999; Carbonneau *et al.*, 2003). At a meso-scale, recent development in digital photogrammetry for estimation of erosion and deposition volumes, such as DEMs derived from aerial photography (Lane *et al.*, 2000; Baily *et al.*, 2003), from airborne laser altimetry and from image processing (Lane *et al.*, 2003) have shown that: (1) the optimal digital system for automatic DEM generation matched the performance of digital photogrammetry for the collection of geomorphological data; and (2) DEMs generated from digital photogrammetry, laser altimetry and image processing produced more reliable erosion and deposition estimates as a result of the large improvement in spatial density that synoptic methods provides. At a macro-scale, DEMs derived from a new generation of planned satellite sensors will have a significant impact on the development of synthetic aperture radar (Chandler, 1999) and on remote sensing technologies as well.

Although digital photogrammetry has a lot of potential for geomorphological studies (Lane *et al.*, 2000), as for digital stereophotogrammetric systems, the digitizing of contours and the production of DEMs for the estimation of erosion and deposition volumes is time consuming and computer memory greediness. All the preparation needed to register the aerial photographs (scanning, geo-rectification with GCP's and

TP's), to validate these (with check points) as well as the DEMs automatically derived from aerial photographs was simply enormous (as much as 75 % of the time required for the entire study). But, it is expected that an experience user will do it faster than an inexperienced user principally because many people experience difficulty such as eyestrain and fatigue when they work in a 3-D environment (PCI Geomatics, 2001; 2003). Apart from the aerial photographs and the software needed for a study like this, a WildCat VP760 (3D labs) computer graphic card and a pair of 60GX (NuVision) shutter glasses were necessary.

CONCLUSION

The main objective of this study was to describe the application of a digital stereophotogrammetric methodology for the measurement of streambank erosion, gullying and lateral channel change over time. This methodology, based on a 3-D visualization system offered by PCI Geomatics, was used in conjunction with a GIS, to derive and compare planimetric data from two series of aerial photographs (1975 and 1997) of the Des Envies River catchment. Digital photogrammetric techniques were used to convert these planimetric measurements into volumes by extracting heights data from DEMs automatically generated from stereopairs of aerial photographs.

The precision of the results for the digitizing of contours caused by the use of the 3-D visualization proves to be the most valuable advantage of this photogrammetric system over traditional 2-D visualization systems. The low cost (for the area analysis) is also another advantage over traditional methodology such as erosion pins and cross-profile surveying.

REFERENCES

Baily B, Collier P, Farres P, Inkpen R, Pearson A. 2003. Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms. *Earth Surface Processes and Landforms* **28**: 307-320.

Barker R, Dixon L, Hooke J. 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* **22**: 1217-1227.

Carbonneau PE, Lane SN, Bergeron NE. 2003. Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing* **24**: 2837-2854.

Chandler J. 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms* **24**: 51-63.

Daniel C, Tennant K. 2001. DEM quality assessment. In *Digital Elevation Model Technologies and Application: The DEM Users Manual*, Maune DF (ed). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 395-440.

Downward SR, Gurnell AM, Brookes A. 1994. A methodology for quantifying river channel planform change using GIS. In *Variability in Stream and Sediment*

Transport. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, Canberra, December.

Grün A, Bär S, Bühner T. 2000. DTMs Derived Automatically from DIPS: Where do we stand? *Geoinformatics* 3: 36-39.

Gurnell AM. 1997. Channel change on the river Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regulated Rivers: Research and Management* 13: 13-26.

Ham DG, Church M. 2000. Bed-material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1123-1142.

Kronvang B, Svendsen LM, Jensen JP, Dørge J. 1999. Scenario analysis of nutrient management at the river basin scale. *Hydrobiologica* 410: 207-212.

Lane SN, 2000. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogrammetric Record* 16: 937-957.

Lane SN, James TD, Crowell MD. 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record* 16: 793-821.

Lane SN, Westaway RM, Hicks DM. 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms* **28**: 249-271.

Lane SN, Reid SC, Westaway RM, Hicks DM. 2004. Remotely Sensed Topographic Data for River Channel Research: The identification, Explanation and Management of Error. In *Spatial Modelling of the Terrestrial Environment*, Kelly R, Drake N, Barr S (eds). Wiley: Chichester, 113-136.

Laubel AR, Kronvang B, Larsen SE, Pedersen ML, Svendsen LM. 2000. Bank erosion as a source of sediment and phosphorous delivery to small Danish streams. In *Role of Erosion and Sediment Transport and Contaminant Transfer*. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, Waterloo, July.

Lawler DM. 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surface Processes and Landforms* **18**: 777-821.

Liébault F, Piégay H. 2001. Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France. *Geomorphology* **36**: 167-186.

Litynski J. 1988. Les climats du Québec. Cartographic document.

McKergow LA, Weaver DM, Prosser IP, Grayson RB, Reed AEG. 2003. Before and after riparian management: Sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment, Western Australia. *Journal of Hydrology* **270**: 253-272.

Micheli ER, Kirchner JW. 2002. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 1. Remote sensing measurements of streambank migration and erodibility. *Earth Surface Processes and Landforms* **27**: 627-639.

Mikhail EM, Bethel JS, McGlone JC. 2001. *Introduction to photogrammetry*. Wiley: New-York, 375 p.

Mount NJ, Louis J, Teeuw RM, Zukowskyj PM, Stott T. 2003. Estimation of error in bankfull width comparisons from temporally sequenced raw and corrected aerial photographs. *Geomorphology* **56**: 65-77.

Nachtergaele J, Poesen J. 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. *Earth Surface Processes and Landforms* **24**: 693-706.

O'Connor JE, Jones MA, Haluska TL. 2003. Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA. *Geomorphology* **51**: 31-59.

PCI Geomatics. 2001. *OrthoEngine Reference Manual*. 184 p.

PCI Geomatics. 2003. *OrthoEngine User Guide*. 158 p.

Westaway RM, Lane SN, Hicks D. 2003. Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal of Remote Sensing* **24**: 795-815.

Winterbottom SJ, Gilvear DJ. 1997. Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. *Regulated Rivers: Research and Management* **13**, 489-499.

Winterbottom SJ, Gilvear DJ. 2000. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland. *Regulated Rivers: Research and Management* **16**, 127-140.

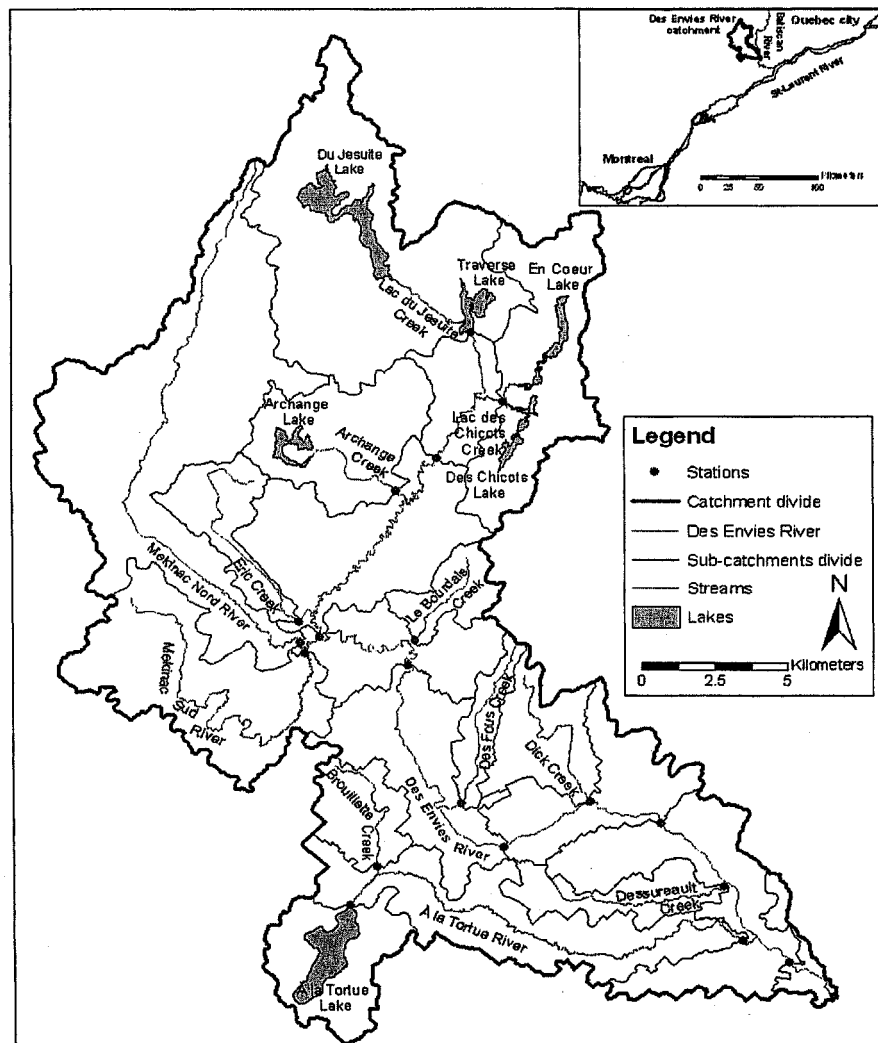


Figure 2.1: The Des Envies River catchment, southwest Quebec (Canada).

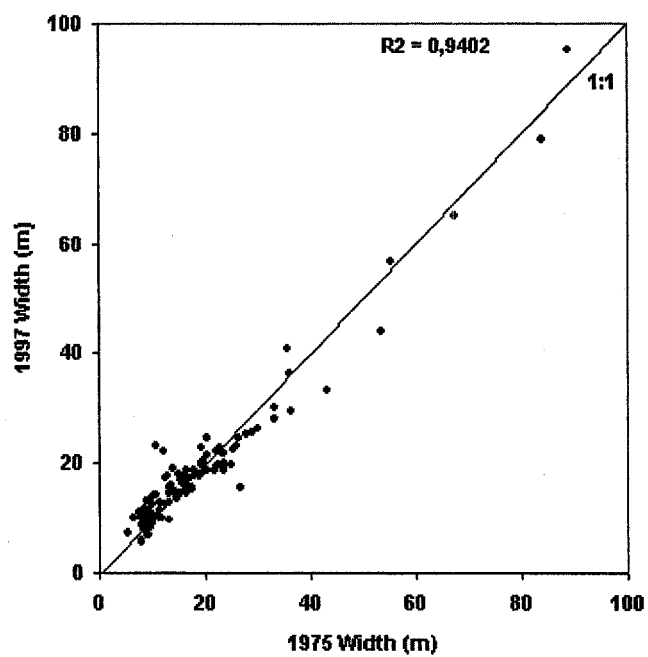


Figure 2.2: Plot of the Des Envies River width in 1975 and 1997 at 113 cross-sections.

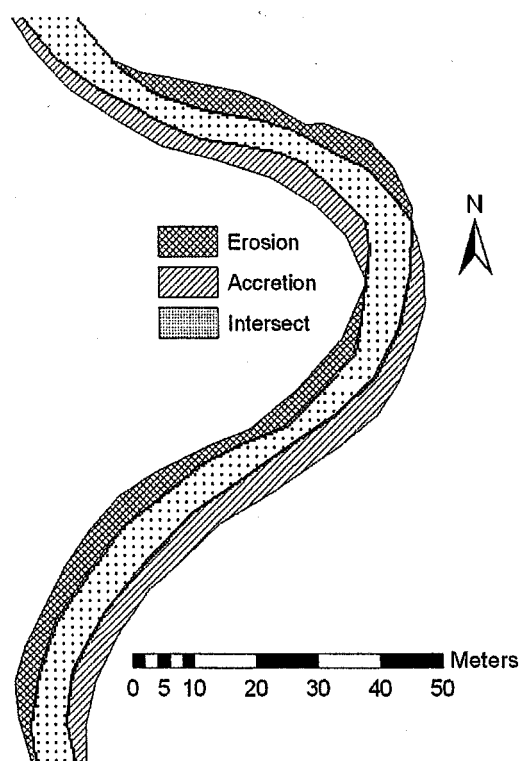


Figure 2.3: Lateral channel change between 1975 and 1997 along the Des Envies River.

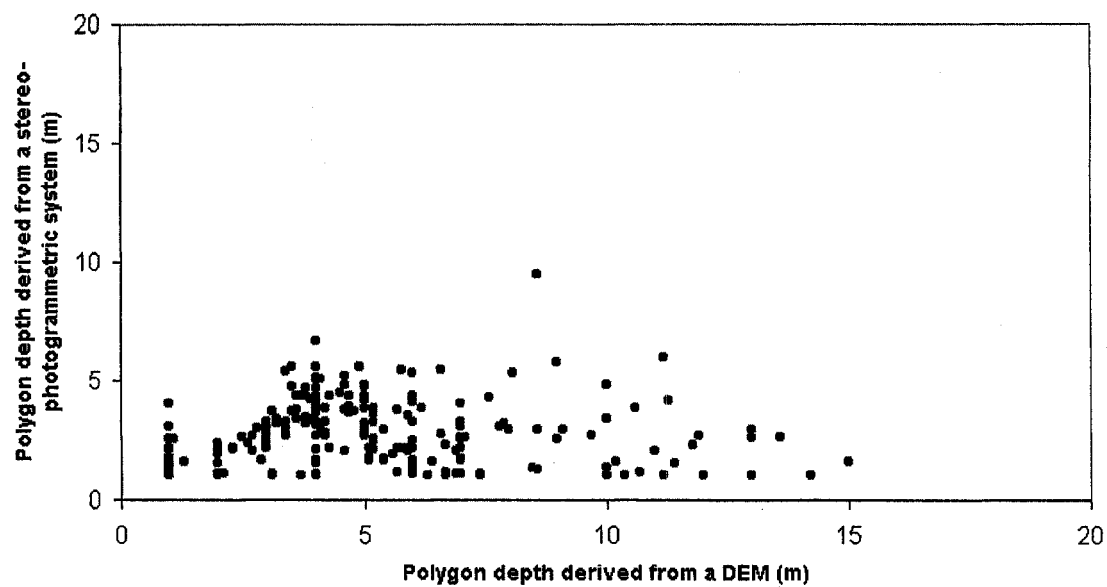


Figure 2.4: The relation between the erosion polygon depth derived from a DEM and a stereophotogrammetric system.

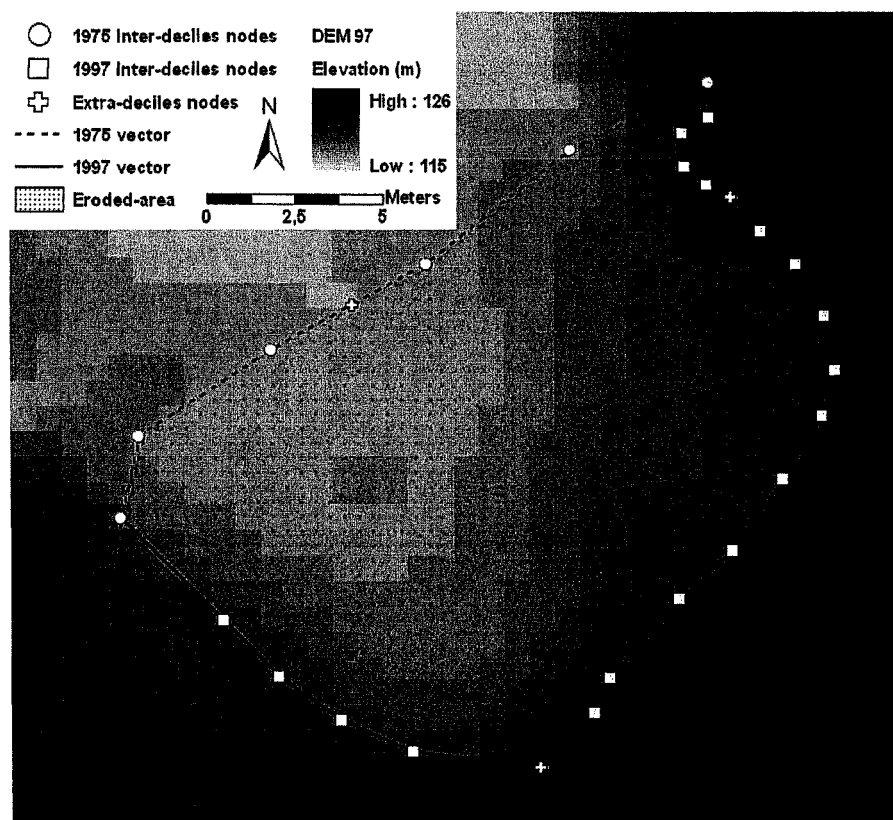


Figure 2.5: Extraction of z-values for each vector node from the DEM.

Table 2.1: Number of aerial photographys and points used in the project.

Year	Aerial photographys	Ground control points	Tie points	Check points
1975	134	1462	1473	695
1997	147	1537	1213	651

Table 2.2: Root mean square errors (RMSE) for the check points of the geo-corrected aerial photographs.

Year	RMSE (m)	
	x	y
1975	0.43	0.41
1997	0.39	0.39

Table 2.3: Summary of streambank erosion, gullyng and lateral channel change.

Mean lateral rates		Area (m ²)	Volumes (m ³)	Tons
	(m)			
<i>Streambank erosion and gullyng</i>				
Minimum	0.06	76 181	222 112	275 532
Measured	0.09	115 009	314 619	385 635
Maximum	0.13*	160 756	420 477	511 413
<i>Lateral channel change</i>				
Erosion				
Minimum	0.07	94 676	207 230	176 977
Measured	0.14	184 670	362 652	346 680
Maximum	0.22	290 618	540 287	547 520
Accretion				
Minimum	0.09	120 050	145 298	263 115
Measured	0.17	217 238	283 882	458 325
Maximum	0.25	328 706	447 913	681 201
Net storage-change				
Minimum		-50 807	-284 044	-189 385
Measured		-82 441	-393 389	-273 990
Maximum		-122 668	-512 851	-377 732

* A large polygon was excluded from these results as it represents an extreme event that is not representative of the erosional processes occurring in this watershed.

CHAPITRE 3

DEUXIÈME ARTICLE

MESURE DE L'ÉROSION DES BERGES, DU RAVINEMENT ET DE LA
MIGRATION DES COURS D'EAU DANS LA PORTION AGRICOLE DU BASSIN
VERSANT DE LA RIVIÈRE DES ENVIES (QUÉBEC)

Maxime Brien¹

et

Stéphane Campeau^{1,2}

1. Section de géographie, département des Sciences humaines, Université du Québec à Trois-Rivières, CP 500, Trois-Rivières, QC, Canada G9A 5H7
2. Correspondance : stephane.campeau@uqtr.ca

MESURE DE L'ÉROSION DES BERGES, DU RAVINEMENT ET DE LA
MIGRATION DES COURS D'EAU DANS LA PORTION AGRICOLE DU BASSIN
VERSANT DE LA RIVIÈRE DES ENVIES (QUÉBEC)

RÉSUMÉ

La stéréophotogrammétrie numérique a été utilisée pour spatialiser et quantifier l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau du secteur agricole du bassin versant de la rivière des Envies. Ce bassin versant, situé dans le Sud-Ouest du Québec (Canada), chevauche deux provinces naturelles soit le bouclier canadien et les basses-terres du Saint-Laurent. Ce chevauchement engendre trois patrons d'écoulement différents: rectiligne dans le bouclier, encaissé dans les basses-terres et méandré dans la vallée mitoyenne. Les mesures ont été réalisées sur un intervalle de 22 ans (1975-1997) dans les basses-terres et la vallée mitoyenne. Des vecteurs géoréférencés ont été tracés à partir de photographies aériennes au 1 : 15 000 numérisées et géoréférencées afin d'identifier les talus (érosion des berges et ravinement) et les marges latérales des cours d'eau (migration des cours d'eau). Les vecteurs ont été intégrés et superposés dans un système d'information géographique (SIG) pour spatialiser et quantifier l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau en terme de nombre de polygones, de taux de recul et de migration, de mètres linéaires de cours d'eau affectés par ces processus et de tonnage. Un bilan sédimentaire partiel a aussi été effectué. Celui-ci indique que 12 454 tonnes/an de sédiments ont été érodés dont 76 % proviennent de la

portion de la rivière des Envies située dans les basses-terres. Ce territoire compte aussi pour 65 % des sédiments accumulés ce qui en fait le secteur le plus dynamique de l'ensemble du bassin versant de la rivière des Envies. La hauteur du talus ainsi que la composition granulométrique des berges pourraient y favoriser l'érosion des berges et le ravinement, alors que le processus de migration des cours d'eau serait le reflet de mouvements latéraux continus des cours d'eau. De plus, ce secteur du bassin versant est celui où les activités agricoles sont en plus forte concentration ce qui a mené au déboisement et à la mise en culture des bandes riveraines. Ainsi, une large part des berges y sont dénudées et les bandes riveraines arbustives ou arborescentes sont absentes ou de faible importance. Malgré la lourdeur des procédures de préparation des photographies aériennes, la stéréophotogrammétrie numérique s'est avérée rapide et efficace pour spatialiser et quantifier les processus géomorphologiques à l'étude. Elle peut être appliquée à une portion de cours d'eau ou à l'échelle d'un bassin versant avec une précision et des coûts intermédiaires entre les techniques aéroportées et les techniques traditionnelles d'analyse de photographies aériennes.

MOTS CLÉS : stéréophotogrammétrie numérique; photographies aériennes; érosion des berges; ravinement, migration des cours d'eau; SIG.

ABSTRACT

A digital stereophotogrammetric system was used for the measurement of streambank erosion, gullying and lateral channel change from aerial photographs of the agricultural part (93 km²) of the Des Envies River catchment. This catchment is located half on the Canadian Shield and half on the St-Lawrence River lowlands in southwest Quebec. The Canadian Shield part is characterized by straight channels while the St-Lawrence River lowlands are characterized by a large plain where the channels are mainly sinuous. Comparison of detailed measurements of streambank erosion, gullying and lateral channel change were completed for 684 km of streams for 1975 and 1997 within a geographic information system (GIS). For streambank erosion and streambank gullies, bankfull location and slope crests were digitized on the 1975 aerial photographs. Within the 3-D feature extraction, the aerial photographs of 1997 were then loaded with the vectors mapped in 1975, and every difference in the position of the bankfull location between the two years was digitized with new vectors. With these vectors, feature change polygons were created for the calculation of areal of erosion. For the lateral channel change, the water level location (the river stage) was mapped for the streams of 1975 and 1997. Then, the water-level lines were compared and feature change polygons were created for the areal calculation of erosional and depositional changes. These processes were quantified by the amount of polygons, lateral rates, stream length erosion or deposition and sediments tons. Results show that 12 454 tons of sediment were eroded per year and that 76 % came from the Des Envies river lowlands part as for, 65 % of the deposited sediments. Bank height and composition seems to be the majors

causes for bank erosion while lateral rates reflects historical lateral channel changes. In the lowlands, agriculture is the main activity and most of the bank are unvegetated. As for the low cost (for the area analyze), results precision for the digitizing of contours with this photogrammetric system proves to be a valuable advantage over other technique for the measurements of streambank erosion, gullying and lateral channel change.

KEY WORDS: stereophotogrammetric system; aerial photography; streambank erosion; gullying; lateral channel change; GIS.

INTRODUCTION

L'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau sont des processus naturels qui engendrent des changements dans la morphologie des cours d'eau. Ces processus provoquent une réduction de la végétation et de la faune des habitats riverains en plus d'être la cause de pertes de sol pour les propriétaires riverains. Ils sont aussi la source d'une partie des matières en suspension que l'on retrouve dans plusieurs cours d'eau ce qui augmente la pollution des ceux-ci et réduit la qualité des écosystèmes aquatiques. Comme plusieurs recherches le suggèrent, les programmes de restauration des cours d'eau peuvent en augmenter la stabilité et amener une réduction significative de l'érosion des berges et de la concentration des matières en suspension dans les cours d'eau (McKergow et al., 2003; Kronvang et al., 1999).

Les méthodes de détermination des taux de migration des cours d'eau (Gurnell, 1997; Ham et Church, 2000; Winterbottom et Gilvear, 2000; Micheli et Kirchner, 2002) et de l'érosion des berges (Saint-Laurent et al., 2001) sont des techniques établies permettant de spatialiser et de quantifier ces problèmes à l'échelle d'un cours d'eau (Lawler, 1993; Mount et al., 2003, O'Connor et al., 2003), d'un bassin versant ou d'une région (Rinaldi, 2003). Récemment, l'utilisation conjointe des photographies aériennes et des SIG pour la mesure des processus géomorphologiques s'est répandue (voir Lawler, 1993; Gurnell, 1997; Winterbottom et Gilvear, 2000; Micheli et Kirchner, 2002).

D'autre part, depuis 2002, plusieurs partenaires se sont regroupés afin de mettre en place un plan de réduction de la pollution diffuse et de mise en valeur de la biodiversité dans le bassin versant de la rivière des Envies. Ce programme de restauration nécessitait une connaissance préalable des processus d'érosion et des sources de sédiments et de contaminants transportés vers les cours d'eau. Le projet a donc donné lieu à une campagne intensive de mesures entre 2002 et 2004. La première étape du projet visait à évaluer la qualité de l'eau des cours d'eau du bassin versant. La deuxième étape, qui fait l'objet de la présente étude, visait à mesurer l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau à partir de photographies aériennes. Quant à la troisième étape, elle consistait à évaluer l'intégrité des écosystèmes aquatiques à partir des communautés clés (diatomées, invertébrés et poissons). La quatrième étape consistera à effectuer la synthèse des données acquises et à effectuer le bilan des charges (sédiments et nutriments) en fonction des différentes sources (milieu forestier, milieu urbain et milieu agricole). À partir des données acquises, un programme de restauration des habitats riverains et aquatiques sera élaboré en collaboration avec les partenaires du projet et les propriétaires riverains. Enfin, un programme de suivi sera mis sur pied afin d'évaluer la réponse des cours d'eau et de leurs écosystèmes aux mesures de restauration mises en place.

Cet article présente les résultats de la mesure de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau obtenus à l'aide d'un système de stéréophotogrammétrie numérique. Les objectifs spécifiques sont : (a) de présenter et de comparer les résultats par sous-bassins; (b) de comparer les résultats obtenus dans les basses-terres et la vallée mitoyenne; (c) de discuter des résultats obtenus.

3.2 Site à l'étude

Le bassin versant de la rivière des Envies est situé dans le sud-ouest du Québec sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent (Figure 3.1). Il chevauche deux provinces naturelles soit le bouclier canadien et les basses-terres du Saint-Laurent. Ce chevauchement engendre trois patrons d'écoulement différents: rectiligne dans le bouclier, encaissé dans les basses-terres et méandré dans la vallée mitoyenne. Son cycle hydrologique est essentiellement influencé par la fonte des neiges au printemps ce qui engendre une période d'inondation prolongée et cause une forte pression sur les berges et sur la végétation riparienne. Le reste de l'année, l'étiage est sévère (surtout au cours de l'hiver) malgré une période de crue automnale et quelques événements de fortes précipitations communes à un climat continental subhumide subpolaire (Litynski, 1988). Le bassin reçoit entre 850 et 1200 mm de précipitations par année également réparties entre l'été et l'hiver.

Les basses-terres du Saint-Laurent, dont le relief est relativement plat, forment une vaste plaine localement interrompue par des collines dont l'altitude est généralement inférieure à 150 m. Elles reposent sur une plate-forme de roches sédimentaires, quant aux dépôts de surface ils correspondent au matériel meuble au-dessus du socle rocheux (Li et Ducruc, 1999). Ce matériel (dépôts d'argile, de limons marins de la Mer de Champlain et de sables deltaïques) est de composition et d'épaisseur variable (Li et Ducruc, 1999). En l'absence de dépôts de surface, c'est le roc qui affleure. Des alluvions et des dépôts morainiques viennent compléter la majorité des sols cultivables du bassin versant.

Dans le bassin versant de la rivière des Envies, la forêt est l'occupation dominante et ce, principalement par sa présence dans le bouclier canadien. Selon les données du recensement de Statistique Canada de 2001 (incluant le recensement agricole), celle-ci occupe une superficie de 350 km², soit 72 % du territoire à l'étude. Pour sa part, l'agriculture occupe 19 % (93 km²) de la superficie totale du bassin versant. Principalement située dans les basses-terres du Saint-Laurent, cette activité est centrée sur les productions animales alors que les pratiques agricoles sont dominées par les labours d'automne. Le milieu urbain couvre environ 7 km², soit moins de 2 % du territoire à l'étude. Il est caractérisé par la ville de Saint-Tite à laquelle s'ajoutent quelques villages épars dans le bassin versant dont la population est peu élevée. Environ 12 000 habitants se partagent ce territoire de près de 500 km² soit une densité de 24 habitants au kilomètre carré.

3.3 Matériel et méthodes

Vingt sites d'échantillonnage (8 sur la rivière des Envies et 12 à l'embouchure des principaux tributaires) ont été visités à 18 reprises entre 2002 et 2004 afin de mesurer le débit et la qualité de l'eau. Les sous-bassins de ces stations furent tracés dans un SIG (ArcGIS 9,0; ESRI, 2002) afin de caractériser le territoire entre chacune des stations. Pour le reste de ce manuscrit ces unités territoriales seront considérées comme des 'sous-bassins'. L'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau ont été mesurés dans les 13 sous-bassins situés dans la portion agricole du bassin versant de la rivière des Envies en plus de faibles portions des sous-bassins 9 (majoritairement

résidentiels) et 17 (majoritairement forestiers). Les mesures ont ainsi été réparties sur un territoire de 93 km² couvrant 684 km de cours d'eau.

3.3.1 Matériel

Un système de stéréophotogrammétrie numérique (PCI Geomatics, 2001; 2003) a été utilisé pour quantifier et spatialiser l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau non-rectifiés à partir de photographies aériennes en noir et blanc (échelle 1 : 15 000) de 1975 et de 1997. Les photographies aériennes réparties sur 15 lignes de vol pour chaque année de l'étude ont été numérisées avec un scanner ajusté à 600 dpi pour obtenir un maximum de précision tout en conservant une taille de fichier convenable. Le recouvrement latéral entre les photos est de 60 %. Un recouvrement de cet ordre fournit deux points de vue d'un même territoire et est essentiel pour la vision stéréoscopique qu'elle soit traditionnelle ou numérique. Les années 1975 et 1997 ont été sélectionnées en raison de la disponibilité et de la qualité des photographies aériennes.

Le système de stéréophotogrammétrie numérique a été choisi car il permet de numériser et d'enregistrer, à l'aide de vecteurs planimétriques de qualité, les coordonnées précises des objets visibles sur les images (PCI Geomatics, 2001; 2003). Il permet également la vectorisation à l'écran et le transfert vers un SIG pour l'analyse quantitative des vecteurs. L'utilisation d'un SIG offre une grande flexibilité pour conserver et analyser les données planimétriques historiques en plus de faciliter l'estimation de la précision des résultats (Downward et al., 1994). Toutefois, l'utilisation d'un SIG pour l'analyse de

photographies aériennes ne permet pas d'éradiquer complètement les sources d'erreur (Downward et al., 1994; Gurnell, 1997).

Tout comme Gurnell (1997) l'avait fait, quelques stratégies ont été adoptées pour faciliter la comparaison de l'information extraite à partir de photographies aériennes prises à différentes dates du territoire à l'étude: (a) les photographies utilisées étaient de même échelle; (b) le même opérateur a effectué toutes les interprétations; (c) un groupe de points de contrôle standard a été utilisé pour géo-référencer les photographies aériennes à la même base; (d) une définition standard du terme berge a été utilisée (Mount et al., 2003).

3.3.2 Méthodes

3.3.2.1 Géoréférence et jumelage des photographies aériennes

Des points de contrôle au sol (une vingtaine par photographie) et des points de jonction (une dizaine par duo de photographies) ont servi pour géoréférencer et jumeler les paires de photographies aériennes à partir des fichiers à l'échelle de 1 : 20 000 de la Base de Données Topographiques du Québec (BDTQ) de 1996 (voir le tableau 3.2). Les fichiers de routes ont servi de référence pour les valeurs de positionnement des coordonnées x et y. Les valeurs d'altitude ont pour leur part été extraites d'un MNE généré à partir des courbes hypsométriques (MNE d'une résolution spatiale de 5 m). Des points d'évaluation ont servi à estimer l'erreur d'analyse pour les deux groupes d'images (voir

le tableau 3.2). Des orthophotos spatialisées et rectifiées ont aussi été créées mais pour un usage cartographique seulement.

3.3.2.2 Estimation de l'erreur totale

D'après Mount et al. (2003), dans les études nécessitant des comparaisons image à image et des mesures de mouvements historiques des cours d'eau (déplacements latéraux), si les erreurs d'enregistrement et de mesures ne sont pas identifiées, il devient difficile de déterminer si un changement mesuré au niveau des cours d'eau est le fait d'une erreur dans le processus de mesure ou d'un changement véritable. Ainsi, lorsque l'activité et la taille des cours d'eau diminuent, les changements planimétriques mesurables entre deux sources historiques de données deviennent subtils, il est donc important d'établir si le changement mesuré excède l'erreur inhérente à la méthode (Downward et al., 1994).

L'erreur totale a été évaluée en additionnant les résultats des deux sources d'erreurs potentielles: l'erreur d'enregistrement (soit l'erreur de numérisation et l'erreur de géoréférence) et l'erreur de vectorisation (Downward et al. (1994). Pour quantifier l'erreur d'enregistrement, la méthode décrite par Winterbottom et Gilvear (2000) a été utilisée. Ainsi, la racine carrée de la moyenne du carré des résidus des points d'évaluation (RMSE : Root Mean Squared Error) a été calculée (Tableau 3.3). La RMSE est définie comme suit:

$$r = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}}, \quad (1)$$

Où x est la somme de x_1, x_2, \dots, x_n , pour n points. D'après Winterbottom et Gilvear (2000), cette valeur est la moyenne du déplacement des coordonnées d'un même point sur deux supports cartographiques différents. D'autre part, l'erreur de vectorisation a été quantifiée en analysant la variabilité de vectorisations répétées de berges et de limites latérales de cours d'eau (5 sites et 30 répétitions). Pour ce faire, les vecteurs tracés ont été superposés séparément à l'aide d'un SIG, grâce auquel les valeurs de déplacement des vecteurs de répétitions ont été quantifiées. L'erreur de vectorisation a été estimée à 0,29 m en 1975 (écart-type de 0,26) et à 0,31 m en 1997 (écart-type de 0,21). Quant à l'erreur totale (la moyenne des RMSE des points d'évaluation et l'erreur de vectorisation de chacune des années ont été additionnées) a été estimée à 0,70 m pour les deux années à l'étude.

3.3.2.3 Analyse des photographies aériennes par stéréophotogrammétrie numérique

Les photographies aériennes ont été analysées par stéréophotogrammétrie numérique à l'aide du module *OrthoEngine* du logiciel *Geomatica* (PCI Geomatics, 2001; 2003). Tout comme pour la stéréoscopie traditionnelle, ce module de travail permet de reproduire le territoire en trois dimensions avec un duo de photographies qui se superposent latéralement. Avec la stéréophotogrammétrie numérique, les deux images apparaissent successivement à l'écran à un intervalle régulier et très rapide. Au même moment, une paire de lunette fournie avec le logiciel, permet de voir uniquement l'image qui apparaît à l'écran. Les différences de positionnement des objets contenus dans les images sont perçues comme étant des différences de hauteur.

Cette vision en trois dimensions se faisant dans un environnement numérique, il est possible de tracer des vecteurs dont les mesures sont conservées en fonction des coordonnées exactes de leur emplacement (PCI Geomatics, 2001; 2003). Le fait de travailler dans un environnement numérique permet également de zoomer à une échelle qui facilite le positionnement de la rupture de pente. Trois types de vecteurs ont été tracés :

- la limite entre l'eau et la rive (limites latérales des cours d'eau). Ces vecteurs ont été utilisés afin de mesurer la migration des cours d'eau;
- la rupture de pente du lit plein bord, qui constitue généralement le premier front d'érosion d'importance. Cette rupture de pente, lorsqu'elle est présente, est aisément identifiable à partir des photographies à l'échelle de 1 : 15 000;
- les autres ruptures de pente importantes présentes dans la vallée fluviale. La comparaison de ces ruptures entre les deux années à l'étude a permis de localiser les secteurs où il y a eu des décrochements, des mouvements de masse importants et les zones où le ravinement est actif.

Par contre, des problèmes peuvent compliquer l'interprétation de la position des talus et des marges latérales des cours d'eau et ce, principalement lorsque la végétation nuit à la visibilité. Dans ce cas, il est d'usage de déterminer leur position en interpolant leur position entre les trouées d'arbres ou en considérant que leur position est à la base des arbres afin de minimiser l'effet du déplacement radial des photographies (Gurnell, 1997; Winterbottom et Gilvear, 2000; Juracek, 2000). Winterbottom et Gilvear (2000), qui ont

utilisé la technique de l'interpolation entre les trouées d'arbres, ont fait des validations *in-situ* qui leur ont permis de constater que cette technique ne cause pas d'erreur de positionnement du talus supérieure à 1 m. C'est donc cette méthode qui a été retenue lorsque la végétation nuisait à l'interprétation. Lorsque la largeur des cours d'eau était inférieure à 2 m (plus de 2 fois la résolution spatiale des photographies aériennes), aucune mesure n'a été effectuée puisque la végétation riparienne rendait extrêmement difficile la localisation des talus et des marges latérales des cours d'eau.

3.3.2.4 Calcul des superficies d'érosion des berges, de ravinement et de migration des cours d'eau

Pour quantifier l'érosion des berges et le ravinement, la position des berges (les talus) a été localisée et vectorisée sur les photographies aériennes de 1975. Ensuite, les vecteurs ont été importés et visualisés sur les photographies aériennes de 1997 où toutes les modifications de la position des talus ont été numérisées à l'aide de nouveaux vecteurs. Dans le cas des limites latérales des cours d'eau, celles-ci ont été vectorisées séparément pour les deux années à l'étude. Dans les deux cas, les vecteurs des deux années ont été superposés dans le SIG ArcGIS 9,0 afin de créer soit des polygones d'érosion soit des polygones d'accumulation là où des changements ont eu lieu (Odgaard, 1987; Lawler, 1993; Micheli et Kirchner 2002). À partir de ces couches de polygones nouvellement créés, le nombre de polygones, les taux de recul et de migration, le nombre de mètres linéaires de cours d'eau affectés par ces processus et le tonnage (érosion et accumulation) ont été calculés.

3.3.2.5 Application de l'erreur estimée aux polygones d'érosion et d'accumulation

Lors de la mesure de changements morphologiques des cours d'eau, à l'aide d'analyse d'image, les estimations d'erreur doivent toujours accompagner les résultats obtenus (Mount et al., 2003). Toutefois, dans la littérature traitant de ce sujet, l'erreur est rapportée de différentes manières, soit comme une incertitude spatiale (Micheli et Kirchner, 2002), en tant qu'intervalle de confiance dans les mesures de largeur de cours d'eau (Liébault et Piégay, 2001) soit en tant qu'incertitude provenant des différences de niveaux d'eau, d'erreurs de transcription et d'erreurs de géoréférence et de numérisation (O'Connor et al., 2003).

Afin d'appliquer l'erreur estimée à nos mesures de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours d'eau, nous avons utilisé une méthode similaire à celle utilisée par Winterbottom et Gilvear (2000) qui ont appliqué l'erreur estimée en numérisant derrière la position de la berge de l'ordre de 1X l'erreur estimée avec des vecteurs de localisation. Dans notre cas, nous avons appliqué l'erreur totale estimée à nos polygones d'érosion et d'accumulation plutôt qu'à des vecteurs. Nous avons estimé les superficies minimales et maximales d'érosion et d'accumulation pour chaque polygone de la façon suivante: à partir de la couche de polygones des superficies mesurées, une nouvelle couche de polygones a été générée à l'intérieur des polygones mesurés en utilisant la technique des zones tampons (buffers) dont la largeur est égale à l'erreur estimée; à partir de la nouvelle couche de polygones générée, les superficies minimales ont été quantifiées en excluant les polygones d'une superficie égale à zéro (qui sont inférieure à l'erreur totale). Pour les superficies maximales, une nouvelle couche

de polygones a été générée à l'extérieur des polygones mesurés en utilisant des zones tampons dont la largeur est égale à l'erreur estimée; à partir de la nouvelle couche de polygones générée, les superficies maximales ont été quantifiées.

3.3.2.6 Calcul des volumes et du tonnage d'érosion et d'accrétion

Les estimations de perte sédimentaire ont été effectuées par la multiplication (par polygones) des superficies érodées par les valeurs d'altitude maximale et minimale présentes dans ces polygones d'érosion et d'accumulation. Les valeurs d'altitude ont été extraites de MNE des deux années générés automatiquement à partir des photographies aériennes à l'aide de la fonction «*DEM from stereo*» du module *OrthoEngine* (PCI Geomatics, 2001; 2003). Les valeurs d'altitude ont été extraites aux nœuds des polygones d'érosion et d'accumulation. Par contre, les systèmes de photogrammétrie qui permettent l'extraction de MNE à partir de photographies aériennes sont très sensibles à la végétation présente sur les images. Les valeurs d'altitude de ces MNEs sont calculées à partir du dessus des arbres plutôt que du niveau du sol (Lane et al., 2000). Les valeurs d'altitude ont donc été validées et modifiées à partir du système de stéréophotogrammétrie numérique. La validation fut réalisée pour toutes les valeurs aberrantes et les différences d'altitude supérieures à 3 m. Pour toutes les couches de polygones (minima, mesurées et maxima), ces mêmes valeurs de z ont été utilisées pour les estimations de volumes érodés. Suite à une extraction géomatique des types de sol présents par polygone, les volumes estimés ont été multipliés par la masse volumique du type de sol dominant à l'intérieur des polygones pour fournir des valeurs de tonnage de sédiments érodés (Tableau 3.4).

3.4 Résultats

Au cours des 22 années qui composent l'intervalle de notre étude, de nombreux événements de précipitations et de fonte des neiges sont survenus. Ces événements ont engendré de l'érosion des berges, du ravinement et de la migration des cours de façon très variable à l'intérieur du bassin versant. Dans la section qui suit, cette variabilité est présentée par sous-bassins de quatre façons, soit: le nombre de sites, le taux de recul ou de migration, la longueur de cours d'eau en érosion ou en migration et le tonnage. Bien que les valeurs de superficie et de volume aient été calculées, seules les valeurs de tonnage sont présentées ici puisque toutes ces valeurs dépendent de la même source soit les valeurs de superficie. De plus, ce sont celles qui ont été utilisées pour les calculs du bilan sédimentaire partiel présenté plus loin.

3.4.1 Quantification et spatialisation de l'érosion des berges et de la migration des cours d'eau

Dans le bassin versant de la rivière des Envies, ce sont 891 polygones d'érosion des berges et de ravinement qui ont été délimités alors que pour la migration des cours d'eau 1523 polygones ont été délimités soit 742 polygones d'accumulation et 781 polygones d'érosion (Tableaux 3.5 et 3.6). Parmi les 891 polygones d'érosion des berges et de ravinement, 684 sont situés dans la portion en aval du bassin versant (les basses-terres) ce qui représente 77 % des sites alors que seulement 207 sites se retrouvent dans la vallée mitoyenne soit 23 % des sites. Quant à la portion de la rivière des Envies située dans les basses-terres (sous-bassin 1, 2, 5 et 7) elle compte pour 58 % de tous les

polygones d'érosion de berges et de ravinement. Dans les sous-bassins 2, 5 et 7 on retrouve respectivement 190, 169 et 139 polygones (ce qui représente 21 %, 19 % et 16 % du nombre total de sites). De plus, si on compare le part relative du chenal principal versus ces tributaires, on constate que 72 % des sites identifiés proviennent des rives de la rivière des Envies qu'elles soient situées dans les basses-terres ou dans la vallée mitoyenne. Outre le sous-bassin 6 pour l'érosion des berges et le ravinement, le sous-bassin 3 est celui où l'on retrouve la majorité des sites parmi les tributaires et ce, autant pour l'érosion que pour l'accumulation (migration des cours d'eau. D'ailleurs, pour la migration des cours d'eau, la répartition spatiale du nombre de sites est moins distinctive que pour l'érosion des berges et le ravinement (Tableaux 3.5 et 3.6). Ainsi, 62 % des sites en migration sont situés dans les basses-terres. Toutefois, le bassin 3 compte pour la moitié de ces sites. Le tableau 3.6 nous permet de distinguer les autres sous-bassins les plus actifs du bassin versant tels que les portions de la rivière des Envies de la vallée mitoyenne (sous-bassins 11, 13 et 18). Ce tableau nous permet aussi de constater que pour le nombre de sites, les processus d'accumulation et d'érosion sont équivalents pour tous les sous-bassins.

On constate aussi que le taux de recul ou de migration (érosion des berges et ravinement) est très variable dans le bassin versant. Cependant, le sous-bassin 1 se démarque considérablement des autres sous-bassins et ce, principalement pour les calculs d'érosion (berges et migration). D'ailleurs, pour l'érosion des berges, le taux de recul moyen y est de huit fois supérieur à la moyenne de tous les sous-bassins (34,4 mm versus 4,3 mm) et de trois fois supérieur à ce qu'il est pour le deuxième sous-bassin le plus dynamique soit le sous-bassin 5 (34,4 mm versus 10,1 mm). Bien que le taux de

migration soit un peu plus équitable dans le bassin versant, les sous-bassins 1, 3, 13 et 18 se distinguent tout de même pour la migration des cours d'eau (accumulation et érosion).

Dans le cas de la longueur de cours d'eau affectée par les processus géomorphologique à l'étude, quelques distinctions viennent modifier quelque peu le portrait du bassin versant de la rivière des Envies. Ainsi, en quantifiant les processus de cette façon, on remarque que les sous-bassins 2, 5 et 7 se distinguent pour le nombre de mètres de cours d'eau affectés par l'érosion des berges et le ravinement (respectivement 24 %, 18 % et 16 %). Pour la migration des cours d'eau, les sous-bassins 3 et 13 sont les plus importants avec respectivement 26 % et 15 % du nombre de mètres de cours d'eau en accumulation puis 48 % du total de mètres de cours d'eau affectés par l'érosion (24 % chacun).

En terme de tonnage, les résultats du tableau 3.5 montrent qu'une moyenne de 17 529 tonnes de sédiments ont été perdues annuellement par l'érosion des berges et ravinement entre 1975 et 1997. De ce total, 90 % des sédiments érodés sont attribuables aux sous-bassins des basses-terres du Saint-Laurent avec près de 16 000 tonnes par année. Pour ce qui est de la migration des cours d'eau, ce sont 15 758 tonnes de sédiments qui ont été érodés (principalement dans les sous-bassins 3 et 13 avec près de 50 %). De plus, 20 833 tonnes de sédiments se sont accumulés dans les cours d'eau du bassin versant et ce, principalement près de l'embouchure de la rivière des Envies (les sous-bassins 1, 2 et 3 comptent pour 52 % du tonnage total).

En somme, le bilan de la migration des cours d'eau est quant à lui positif, la quantité de sédiments accumulés dans les cours d'eau étant plus élevée que la quantité érodée.

L'accumulation se fait dans les sous-bassin 11, 13 et 18 et particulièrement dans la partie des basses-terres près de l'embouchure de la rivière où elle est généralement supérieure à l'érosion. Il semble donc qu'une partie des sédiments en provenance de l'érosion des sols, des berges et des tributaires s'accumule dans le corridor fluvial en aval du bassin versant.

Le bilan sédimentaire du bassin versant, qui tient compte de la perte de sédiments par érosion des berges et migration des cours d'eau et du gain par accumulation de sédiments dans les cours d'eau, montre qu'au total le bassin versant perd 12 454 tonnes de sédiments par année (Figure 3.2). De ce total, la portion de la rivière des Envies située dans les basses-terres compte pour 76 % des pertes de sédiments bien qu'une large part des sédiments se soit accumulée dans ce secteur (65 % des sédiments accumulés). Les sous-bassins qui retiennent l'attention dans ce bilan sont les sous-bassins 1, 5, 6, 7 et 13 où les pertes de sédiments correspondent à près de 93 % des pertes totales évaluées dans les 15 sous-bassins à l'étude. Le bilan nous permet aussi de constater que les sous-bassins 3 et 18 sont ceux où l'accumulation est la plus importante bien que leurs valeurs soient relativement faibles.

3.5 Discussion

3.5.1 Érosion des berges, ravinement et migration des cours d'eau

Dans le bassin versant de la rivière des Envies, l'importance de l'érosion des berges et du ravinement varie de façon évidente entre la portion amont (la vallée mitoyenne) et la

portion aval (les basses-terres) où ces processus sont beaucoup plus actifs. Ce pattern se distingue autant en terme de nombre de sites que de valeurs de taux de recul ou de migration, de mètres de cours d'eau en érosion ou en accumulation que de tonnage. Il reflète bien les caractéristiques physiographiques (rectiligne et encaissé) de la portion aval du territoire étudié et ce, principalement pour le corridor fluvial de la rivière des Envies. La hauteur du talus ainsi que la composition granulométrique des berges pourraient y favoriser l'érosion des berges et le ravinement. De plus, ce secteur du bassin versant est celui où les activités agricoles sont en plus forte concentration ce qui a mené au déboisement et à la mise en culture des bandes riveraines. Ainsi, une large part des berges y sont dénudées et les bandes riveraines arbustives ou arborescentes sont absentes ou de faible importance. La portion amont du bassin versant (la vallée mitoyenne) quant à elle est très peu affectées par les processus d'érosion des berges et de ravinement ce qui reflète aussi les caractéristiques physiographiques (méandré et peu encaissé) de cette portion du territoire. Bien qu'une partie des rives y soit là aussi affectée par le déboisement et la mise en culture des bandes riveraines, l'agriculture y est moins intensive. Ainsi, les processus d'érosion des berges et de ravinement seraient simplement le reflet de mouvement latéraux continus des cours d'eau.

Lorsqu'on regarde la migration des cours d'eau, le pattern préalablement observé entre la portion amont et la portion aval ne se reflète pas dans les résultats obtenus. Bien que dans certains cas les différences soient notables (comme pour le nombre de polygones) il reste que ce processus ne semble pas influencé par les différences au niveau de l'hydrodynamique des cours d'eau (méandrés en amont ou rectilignes en aval). D'ailleurs, nos résultats pour les autres mesures indiquent une répartition spatiale

proportionnelle entre les deux environnements. Cependant, la principale distinction notée précédemment au niveau de la migration se situe dans les sous-bassins près de l'embouchure où l'accumulation mesurée reflète les processus de déposition ou de sédimentation généralement en cours dans cette portion d'un bassin versant (continuum amont-aval soit érosion en amont, accumulation en aval et transport entre les deux).

3.5.2 Bilan sédimentaire du bassin versant

Le bilan sédimentaire (quoique partiel) réalisé dans le cadre de cette étude indique clairement la différence importante en terme de dynamique des cours d'eau entre les sous-bassins de la vallée mitoyenne et ceux des basses-terres du Saint-Laurent. Cette différence de dynamique peut s'expliquer par la forme du chenal principal qui est plus méandré dans la portion amont que dans la portion aval où il est plutôt rectiligne (à l'exception du sous-bassin 3). Bien que nos résultats pour la migration des cours d'eau montrent que l'accumulation est plus importante que l'érosion (de l'ordre de 24 %), le bilan sédimentaire du bassin versant est négatif. La contribution importante de l'érosion des berges et du ravinement dans les basses-terres explique cet état de fait. Cependant, ce bilan ne tient pas compte des pertes par érosion des sols. Pour compléter le bilan entamé dans le cadre de cette étude et dégager la part respective de l'érosion des sols et de l'érosion des berges dans le bilan sédimentaire du bassin versant, celui-ci sera comparé ultérieurement à la charge sédimentaire des cours d'eau.

3.5.3 Comparaison des résultats avec ceux de d'autres études

Afin de bien situer nos résultats en regard de la littérature disponible sur le sujet, nous avons recherché des études ayant traité des mêmes processus et utilisant une technique similaire (photo-interprétation). Bien qu'il ait été relativement aisé de trouver des études portant sur la migration des cours d'eau et le ravinement, bien peu d'études ont mesuré les processus d'érosion des talus sur un aussi vaste territoire que le nôtre. De plus, si l'on compare notre études avec d'autres études du même genre, on remarque des différences importantes au niveau :

- de la méthode de mesure de la migration des cours d'eau;
- de l'échelle des photographies aériennes et documents cartographiques;
- de l'environnement hydrologique où les mesures ont été effectuées;
- de la méthode de calcul de l'erreur total;
- du système de numérisation utilisé.

Toutes ces différences rendent plus complexe une comparaison valable des études réalisées sur le sujet. Cependant, afin de situer les résultats obtenus dans notre étude, nous allons tout de même tenter de les comparer en isolant les différents processus que nous avons mesurés.

En premier lieu, si l'on compare l'erreur que nous avons mesurée avec celle qui est présentée par Mount et al. (2003), on remarque rapidement une importante différence. Dans notre étude, celle-ci est de 0,70 m alors que dans l'étude de Mount et al. (2003) elle varie de 1,40 m à 5,41 m en fonction de la procédure de rectification qu'ils ont

appliquée (géorectifié et orthorectifié) et du système qu'ils ont utilisé (Paintshop Pro et Erdas Imagine). Dans le cas de l'étude de Winterbottom et Gilvear (2000) l'erreur varie de 3,6 à 6,1 m bien que pour les besoins de la cause elle ait été ramenée à 5 m comme pour Gurnell et al. (1994). Ainsi, notre erreur se situe toujours en deçà de celle mesurée dans les autres études ce qui est un des avantages d'utiliser un système de visualisation 3-D pour numériser des éléments eux aussi en 3-D.

Deuxièmement, en comparant les résultats obtenus lors de la mesure de la migration des cours d'eau, on remarque que le taux moyen de recul annuel varie grandement d'un environnement à l'autre. Micheli et Kirchner (2002) ont mesuré, pour la rivière Sacramento en Californie, des taux variant de 0,23 m à 1,5 m dans un cours d'eau d'une largeur de 30 m en numérisant et comparant des vecteurs tracés au centre du cours d'eau. En numérisant et comparant des vecteurs tracés aux marges latérales des cours d'eau, O'Connor et al. (2003) ont mesuré des taux de migration variant de 4,0 m à 12,7 m pour des cours d'eau anastomosés de l'État de Washington (Quinault et Queets) dont la largeur de certaines portions varie entre 95 m, 165 m et 240 m. Puis, avec cette même méthode, Khan et Islam ont mesuré des taux de migration moyens variant généralement entre 80 m et 400 m sur le fleuve anastomosé Brahmaputra-Jamuna (Chine, Inde et Bangladesh) dont la largeur était de plus de 10 km en 1992. Pour notre part, en utilisant nous aussi la technique de numérisation et de comparaison des marges latérales des cours d'eau, nous avons obtenu des taux de recul et de migration variant de 0,6 mm à 34,5 mm sur des cours d'eau dont la largeur varie entre 2 m et 50 m. Ainsi, bien que des mesures similaires aient été effectuées dans d'autres études, plusieurs paramètres tels que la largeur et le type de cours d'eau viennent contrecarrer la possibilité de les comparer

efficacement. Cependant, bien que les valeurs présentées par Micheli et Kirchner (2002) soient supérieures à celles de notre étude, elles sont somme toute dans un ordre de grandeur similaire au nôtre tout comme certaines valeurs présentées par Ham et Church (2000) pour la rivière Chilliwack en Colombie-Britannique (accumulation maximale moyenne de 17 cm entre 1973 et 1983 pour un tronçon de cette rivière anastomosée).

Or, pour conclure sur les mesures de migration des cours d'eau, il est à noter que désormais de plus en plus de chercheurs se tournent vers des méthodes automatisées de génération de MNE de différence qui leur permettent de quantifier ce processus à court ou à moyen terme (Lane et al., 2003; Westaway et al., 2003). Bien que cette technique semble très prometteuse pour des environnements présentant peu de végétation (chenaux anastomosés), elle semble inapplicable pour des environnements comme le nôtre principalement à cause de la superficie importante et de la présence de végétation riparienne.

Troisièmement, la mesure de ravinement que nous avons utilisée dans notre projet est difficilement comparable avec celle d'autres études du même genre principalement parce que les autres études portant sur le sujet se sont plutôt concentrées sur le ravinement aux champs alors que nous avons travaillé ce processus au niveau de la rive seulement (érosion régressive). Toutefois, il est évident pour nous que la méthodologie 3-D utilisée dans notre étude conviendrait parfaitement avec la mesure de ce genre de processus. Tout comme pour Nachtergaele et Poesen (1999), une validation terrain des résultats pourrait permettre d'atteindre un niveau de précision très élevé pour la mesure de ce processus ce qui en faciliterait la compréhension.

Quatrièmement, la comparaison de nos résultats pour l'érosion des berges est aussi un projet ardu. Bien que plusieurs études portant sur le sujet aient été réalisées, aucune autre étude n'a jumelé comme nous la méthode de numérisation et de comparaison de la localisation du haut du talus avec des relevés effectués à l'aide d'un système de visualisation 3-D. En fait, la plupart des études sur le sujet se sont concentré sur des portions de cours d'eau de faible envergure en utilisant des méthodes de relevé nécessitant des visites in-situ. Notons entre autres les relevés effectués par Lawler (1992) et Laubel et al. (2000) à l'aide de jalons de mesures puis ceux effectués à l'aide de la photogrammétrie terrestre (voir Chandler, 1999).

3.5.4 Facteurs qui influencent l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau

Bien que l'érosion des berges soit une source significative de la charge sédimentaire de plusieurs cours d'eau au même titre que les sédiments en provenance des terres avoisinantes qui sont entraînés vers les cours d'eau par le ruissellement de surface (Odgaard, 1987) plusieurs facteurs peuvent en affecter l'impact. Cependant, il est difficile d'en déterminer les processus dominants dans la littérature puisqu'ils varient d'un environnement à l'autre. Toutefois, il est reconnu que la hauteur du talus, la pente de celui-ci, la composition granulométrique et l'absence ou la présence de végétation riparienne ont un impact sur l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau. Afin de comparer les sous-bassins entre eux et de déterminer les facteurs qui influence l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau dans le

bassin versant de la rivière des Envies nous souhaitons, dans le futur, aborder ce sujet d'intérêt dans une publication ultérieure.

CONCLUSION

Malgré la lourdeur des procédures de préparation des photographies aériennes, la précision des données obtenues avec la stéréophotogrammétrie numérique et la rapidité du système pour réaliser un projet d'une telle envergure ont justifié, dans notre cas, l'utilisation de cette méthode pour spatialiser et quantifier l'érosion des berges, le ravinement et la migration des cours d'eau d'un territoire de 93 km². L'utilisation de cette méthode a diminué le temps de travail (puisque'elle permet la vectorisation à l'écran et le transfert vers un SIG) et le coût des mesures *in-situ*, ce qui est souvent, pour des études d'érosion des berges, un facteur limitant incontournable. Désormais, tout est en place pour que soient réalisés des travaux de réhabilitation des cours d'eau du bassin versant de la rivière des Envies, dont le suivi pourra ultérieurement être effectué grâce à la stéréophotogrammétrie numérique. Enfin, pour s'assurer de l'efficacité de cette méthode d'avant-garde, celle-ci devrait être testée dans d'autres sites où l'érosion des berges et la migration des cours d'eau sont des problèmes d'envergure.

REMERCIEMENTS

Nous remercions d'abord Pierre-André Bordeleau (UQTR) et Daniel Blais (MDDEP) pour leur assistance en géomatique. Des remerciements vont également à Joanne Blais et Suzanne Dufresne pour leurs commentaires sur la version préliminaire du manuscrit. Cette étude a bénéficié du support financier du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (contrat de recherche de S. Campeau), du Fonds d'action québécois pour le développement durable (bourse d'étude de M. Brien) et du Fonds institutionnel de recherche de l'UQTR. La Direction du patrimoine écologique et du développement durable du MDDEP a de plus contribué à l'étude en fournissant notamment des fichiers numériques cartographiques. Nous remercions de plus la Direction régionale de la Mauricie du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation pour l'accès à certaines des photographies aériennes utilisées dans le cadre de cette étude. Nous sommes enfin reconnaissant envers les membres du Laboratoire de recherche sur les bassins versants (UQTR), du Laboratoire interdisciplinaire d'application en géomatique environnementale et du Groupe de recherche sur les écosystèmes aquatiques (UQTR) pour leur appui technique et moral.

RÉFÉRENCES

Chandler, J., 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth, Surface, Processes and Landforms* 24: 51-63.

Downward, S.R., Gurnell, A.M. et Brookes, A., 1994. A methodology for quantifying river channel planform change using GIS. In *Variability in Stream and Sediment Transport. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, Canberra, December.

Gurnell, A.M., Downward, S.R. et Jones, R., 1994. Channel planform change on the River Dee meanders, 1876-1992. *Regulated Rivers: Research and Management*, 9: 187-204.

Gurnell, A.M., 1997. Channel change on the river Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regulated Rivers: Research and Management*, 13: 13-26.

Ham, D.G. et Church, M., 2000. Bed-material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, British Columbia. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 25: 1123-1142.

Juracek, K.E., 2000. Channel stability downstream from a dam assessed using aerial photographs and stream-gage information. *Journal of the American Water Resources Association*, 36: 633-645.

Khan, N.I. et Islam, A., 2003. Quantification of erosion patterns in the Brahmaputra-Jamuna River using geographical information system and remote sensing. *Hydrological Processes*, 17: 959-966.

Kronvang, B., L.M., Svendsen, Jensen, J.P. et Dørge, J., 1999. Scenario analysis of nutrient management at the river basin scale. *Hydrobiologica*, 410: 207-212.

Lane, S.N., James, T.D. et Crowell, M.D., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record*, 16: 793-821.

Lane, S.N., Westaway, R.M. et Hicks, D.M., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 28: 249-271.

Laubel, A.R., Kronvang, B., Larsen, S.E., Pedersen, M.L., et Svendsen, L.M., 2000. Bank erosion as a source of sediment and phosphorous delivery to small Danish streams. In *Role of Erosion and Sediment Transport and Contaminant Transfer (Proceedings of a symposium held at Waterloo, Canada, July 2000)*. IAHS Publ. No. 263, pp. 75-82.

Lawler, D.M., 1992. Process dominance in bank erosion systems. In P.A. Carling and G.E. Petts (eds), *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*. Wiley, pp. 117-143.

Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 18: 777-821.

Li, T. et Ducruc, J.P., 1999. Les provinces naturelles. Niveau I du cadre écologique de référence du Québec. Ministère de l'Environnement, 90 p.

Liébault, F. et Piégay, H., 2001. Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France. *Geomorphology*, 36: 167-186.

Litynski, J., 1988. Les climats du Québec. Document cartographique.

McKergow, L.A., Weaver, D.M., Prosser, I.P., Grayson, R.B. et Reed, A.E.G., 2003. Before and after riparian management: Sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment, Western Australia. *Journal of Hydrology*, 270: 253-272.

Micheli, E.R. et Kirchner, J.W., 2002. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 1. Remote sensing measurements of streambank migration and erodibility. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 27: 627-639.

Mount, N.J., Louis, J., Teeuw, R.M., Zukowskyj, P.M. et Stott, T., 2003. Estimation of error in bankfull width comparisons from temporally sequenced raw and corrected aerial photographs. *Geomorphology*, 56: 65-77.

Nachtergaele, J. et Poesen, J., 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 24: 693-706.

O'Connor, J.E., Jones, M.A. et Haluska, T.L., 2003. Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets Rivers, Washington, USA. *Geomorphology*, 51: 31-59.

Odgaard, A.J., 1987. Streambank erosion along two rivers in Iowa. *Water Resources Research*, 23: 1225-1236.

PCI Geomatics., 2001. *OrthoEngine Reference Manual*. 184 p.

PCI Geomatics., 2003. *OrthoEngine User Guide*. 158 p.

Rinaldi, M., 2003. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 28: 587-608.

Westaway, R.M., Lane, S.N. et Hicks, D., 2003. Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal of Remote Sensing* 24: 795-815.

Winterbottom, S.J. et Gilvear, D.J., 2000. A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel, Scotland. *Regulated Rivers: Research and Management*, 16: 127-140.

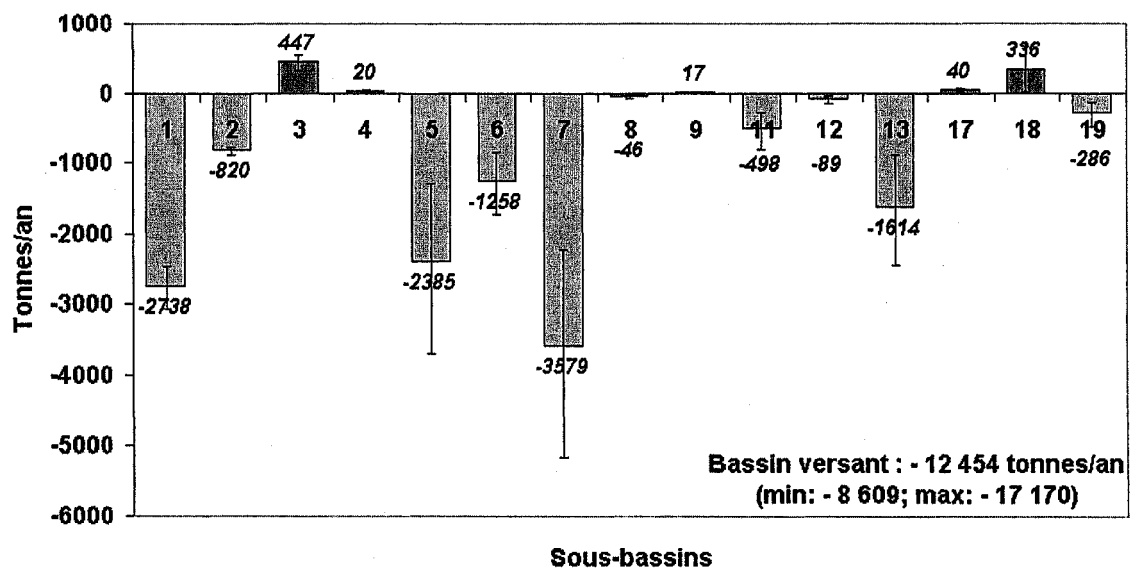


Figure 3.2 : Bilan sédimentaire par sous-bassins. Sédiments érodés ou accumulés entre 1975 et 1997 (tonnes par année).

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiographiques des sous-bassins de la rivière des Envies.

Sous-bassins	Superficie (km ²)	Longueur des cours d'eau (km)
1	5,45	11,13
2	27,44	63,33
3	31,28	67,51
4	10,62	20,62
5	19,38	55,07
6	13,67	29,28
7	24,70	66,19
8	6,71	15,54
9	18,45	8,13
11	16,77	46,94
12	7,64	18,39
13	32,38	92,56
17	23,67	64,86
18	11,20	39,28
19	31,99	86,15
Total	281,35	684,98

Tableau 3.2 : Nombre de photographies aériennes et de point utilisés dans le projet.

Année	Photographies aériennes	Points de contrôle au sol	Points de jonction	Points d'évaluation
1975	134	1462	1473	695
1997	147	1537	1213	651

Tableau 3.3 : La racine carrée de la moyenne du carré des résidus des points d'évaluation (RMSE).

Année	RMSE (m)	
	x	y
1975	0,43	0,41
1997	0,39	0,39

Tableau 3.4 : Masse volumique selon la classe texturale.

Classe texturale	Masse volumique
Argile fine	1,05
Argile	1,10
Limon fin	1,15
Limon	1,20
Limon grossier	1,25
Sable fin	1,30
Sable	1,35
Sable grossier	1,40
*Marc Duchemin, communication personnelle	

Tableau 3.5 : Sommaire de l'érosion des berges.

Sous-bassins	Nombre de polygones	Taux de recul moyen (mm/an)	Linéaire (m/an)	Tonnage
1	16	34,5	68,9	4478
2	190	6,7	263,5	2315
3	76	5,3	157,9	2314
4	11	1,7	23,9	123
5	169	10,1	346,6	2705
6	78	6,2	97,5	1199
7	139	6,1	236,7	2603
8	5	0,8	11,0	46
11	54	2,3	83,3	670
12	21	1,0	18,7	89
13	45	0,2	33,3	99
18	31	1,5	39,7	584
19	56	0,7	60,6	302
Total	891	4,3	1441,7	17529

Tableau 3.6 : Sommaire de la migration des cours d'eau.

Sous-bassins	Nombre de polygones	Taux de migration moyen (mm/an)	Linéaire (m/an)	Tonnage
Accumulation				
1	19	10,2	140	2211
2	35	2,3	344	2124
3	227	15,0	914	6518
4	61	3,7	119	332
5	46	4,4	247	1195
6	6	1,9	28	215
7	49	7,4	312	1229
9	19	2,5	23	80
11	68	7,4	356	1771
13	107	12,4	551	2577
17	17	0,7	36	141
18	82	10,8	467	2246
19	6	0,9	46	195
Total	742	6,4	3583	20833
Érosion				
1	21	33,5	115	472
2	16	6,2	129	629
3	253	21,2	823	3757
4	63	5,9	86	189

5	53	5,1	261	875
6	5	1,8	39	273
7	55	5,4	406	2206
9	19	2,8	25	63
11	73	9,1	313	1599
13	119	7,9	816	4091
17	21	0,6	43	100
18	74	16,3	295	1325
19	9	0,8	51	179
Total	781	7,6	3402	15758

ANNEXE A

Instructions aux auteurs pour les revues suivantes :

- Earth Surface Processes and Landforms
- Le Géographe canadien

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Manuscript Submission. *Earth Surface Processes and Landforms* operates an online submission and peer review system that allows authors to submit articles online and track their progress via a web interface. Please read the remainder of these instructions to authors and then click <http://mc.manuscriptcentral.com/esp> to navigate to the *Earth Surface Processes and Landforms* online submission site.

All papers must be submitted via the online system.

Important information for authors using LaTeX. If you have used LaTeX to prepare your manuscript you should observe the following instructions:

- **Initial submission:** For reviewing purposes you should upload either an .eps, .pdf or .rtf created from your source files.
- **Submission of a revised manuscript:** When submitting your revision you must still upload an .eps, .pdf or .rtf for reviewing purposes. In **addition** you must upload your LaTeX source files. If your manuscript is accepted for publication we will use the files you upload to typeset your article within a totally digital workflow.

The only material Authors may (and must) supply by postal mail to the Editorial Office is:

- a Copyright Transfer Agreement with original signature(s) - without this we will be unable to accept the submission, and
- permission grants - if the manuscript contains extracts, including illustrations, from other copyright works (including material from on-line or intranet sources) it is the author's responsibility to obtain written permission from the owners of the publishing rights to reproduce such extracts using the Wiley Permission Request Form.

The Copyright Transfer Form and the Permissions Form should be sent immediately following the online submission of your article to: Professor Michael J. Kirkby,

Department of Geography, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK. Submission of a manuscript will be held to imply that it contains original unpublished work and is not being submitted for publication elsewhere at the same time. Submissions should be in one of the following forms:

- **Research Articles:** Original and significant research results and syntheses (maximum length 10,000 words).
- **Technical Communications:** Original tests or descriptions of equipment, software or data.
- **Short Communications:** As for research articles or discussions of articles published in the journal, but limited to 2000 words/word equivalents.

Earth Surface Exchanges (ESEX) is intended for rapid publication. Material may be submitted in the following forms:

- **Letters to ESEX** (2000 – 3000 words) should contain methodological developments and results with the expectation that authors will develop their letter into a full journal article in the months following publication.
- **ESEX Commentaries** (1000 – 1500 words) are encouraged for reflection and discussion of particular topics, debates etc.
- **Exchanges** (500 – 1000 words) are an open forum for discussion and debate on ESPL journal articles, as well as other ESEX material.

Manuscript style. The language of the journal is English. All submissions including book reviews should be double-line spaced and have a margin of 3cm all round. No footnotes or appendices should be included. Illustrations should be uploaded as separate files, and not be incorporated into the text. Tables should be included at the end of your main document following the references section.

All submissions should include:

- A title page with the full title, a short title of up to 70 characters and the names and affiliations of all authors. The full address, including email, telephone and fax, of the corresponding author should be given.
- The name(s) of any **sponsor(s)** of the research contained in the paper, along with **grant number(s)** .
- An **abstract** of up to 300 words for a Research Article or Technical Communication and 100 words for a Short Communication except book reviews. An **abstract** is a concise summary of the whole paper, not just the conclusions, and is understandable without reference to the rest of the paper. It should normally contain no citation to other published work.
- Up to five **keywords** that describe your paper for indexing purposes.

Reference style. References should be quoted in the text as name and year and listed at the end of the paper alphabetically. Where possible the DOI for the reference should be included at the end of the reference. Where reference is made to more than one work by the same author published in the same year, identify each citation in the text as follows: (Collins, 1998a), (Collins, 1998b). Where three or more authors are listed in the reference list, please cite in the text as (Collins *et al.*, 1998).

All references must be complete and accurate. Online citations should include date of access. If necessary, cite unpublished or personal work in the text but do not include it in the reference list. References should be listed in the following style:

Johnson RM, Warburton J. 2002. Flooding and geomorphic impacts in a mountain torrent: Raise Beck, central Lake District, England. *Earth Surface Processes and Landforms* **27**: 945-969. DOI: 10.1002/esp.386

Amoroso GG, Fassina V. 1983. *Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection*. Elsevier Science Publishers: Amsterdam

Eldridge DJ, Chartres CJ, Greene RSB, Mott JJ. 1995. Management of crusting and hardsetting soils under rangeland conditions. In *Crusting, Sealing and Hardsetting Soils, Productivity and Conservation*, So HB, Smith GD, Raine SR, Schafer BM, Loch RJ (eds). Australian Society of Soil Science: Brisbane; 381-399.

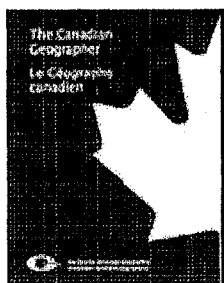
Illustrations. Supply each illustration as a separate file (except compound figures eg 1a, 1b, 1c etc which should be supplied as a single file) , with the figure number and orientation clearly marked. Line artwork must be high-quality. Use hatching, not tints; lettering must be of a reasonable size that would still be clearly legible (8 point or larger) upon reduction, and consistent within each figure and set of figures. Artwork should be supplied at the intended size for printing. The artwork must be sized to the text width of 15cm (double column). All illustrations must be supplied at the correct resolution:

- Black and white and colour photos - 300 dpi
- Graphs, drawings, etc - 800 dpi preferred; 600 dpi minimum
- Combinations of photos and drawings (black and white and colour) - 500 dpi

The cost of printing **colour** illustrations in the journal will be charged to the author. There is a charge for printing colour illustrations of approximately £500 per page. If colour illustrations are supplied electronically in either **TIFF** or **EPS** format, they **may** be used in the PDF of the article at no cost to the author, even if this illustration was printed in black and white in the journal (please indicate on the manuscript which figures are supplied in colour for online publication). The PDF will appear on the *Wiley InterScience* site.

Copyright. To enable the publisher to disseminate the author's work to the fullest extent, the author must sign a Copyright Transfer Agreement, transferring copyright in the article from the author to the publisher, and submit the original signed agreement with the final version of the article accepted for publication. A copy of the agreement to be used (which may be photocopied or printed from the website) can be found in *Earth Surface Processes and Landforms*. Copies may also be obtained from the journal editor or publisher or may be printed from this website.

Further Information. Proofs will be sent to the author for checking. This stage should be used only to correct errors that may have been introduced during the production process. Prompt return of the corrected proofs, preferably within two days of receipt, will minimise the risk of the paper being held over to a later issue. 25 complimentary offprints will be provided to the author who checked the proofs, unless otherwise indicated. Further offprints and copies of the journal may be ordered. There is no page charge to authors.



The Canadian Geographer/Le Géographe canadien

Lignes directrices à l'intention des collaborateurs

The Canadian Geographer/Le Géographe canadien publie des textes originaux de haute valeur scientifique dans tous les domaines de la géographie. La soumission d'un manuscrit sous-entend que le texte n'a jamais été publié, en tout ou en partie, et n'est pas en cours d'évaluation ailleurs. Le comité de rédaction refusera de publier un texte dont la majeure partie du contenu :

- i) est à l'étude pour publication ou a été publié dans une revue ou un chapitre d'un livre;
- ii) est considéré pour publication ou a été publié dans les actes d'un congrès ou dans une publication gouvernementale distribuée à un nombre important de personnes (100 personnes ou plus sur un vaste territoire). Des exceptions à la règle sont possibles si l'auteur a conservé ses droits d'auteur et si le manuscrit soumis en est une version substantiellement remaniée. Pour des raisons similaires, des exceptions peuvent être faites pour des documents publiés sur Internet. Les auteurs doivent communiquer avec le rédacteur en chef et discuter de ces manuscrits avant de les soumettre.

TYPES DE SOUMISSION

Les articles de recherche : à des fins de publication, les articles soumis sont classés suivant les thèmes suivants, soit géographie humaine, géographie physique ou science de l'information géographique, et sont publiés en anglais ou en français. Les articles de recherche doivent rendre compte d'une recherche originale et non préalablement publiée ou encore, à l'égard d'une théorie ou d'une technique, de faits nouveaux permettant d'étendre considérablement la sphère des connaissances en géographie. Des résumés en français et en anglais doivent accompagner chaque article de recherche. La longueur des articles de recherche doit se situer entre 5 000 et 15 000 mots, incluant le texte, les tableaux et les illustrations. Il arrive que des numéros spéciaux composés d'articles de recherche traitant d'un thème choisi soient publiés à l'occasion. Avant d'entreprendre un

numéro spécial, la personne intéressée devrait prendre conseil auprès du directeur de la revue.

Nous acceptons d'autres types de soumission, dont les suivants.

Les textes de la rubrique Focus ou les essais approfondis consistent en une sélection, faite par un directeur scientifique invité, de rapports de recherche d'actualité et originaux ayant trait à un thème commun ou à un domaine de spécialisation particulier. Leur longueur ne doit pas dépasser 5 000 mots, incluant le texte, les tableaux et les illustrations. Toute personne intéressée à soumettre un texte doit faire part de ses intentions au directeur de la revue.

Les essais critiques ont pour objet de présenter une synthèse critique de l'information sur un sujet important. Les personnes intéressées sont invitées à soumettre pour approbation des manuscrits qui expliquent et permettent d'évaluer les thèmes sous-jacents d'un corpus actuel d'ouvrages connexes ou qui constituent un examen critique d'un ou de plusieurs ouvrages de premier ordre selon des méthodes qui vont au-delà du compte rendu de livre habituel. Leur longueur ne doit pas dépasser 4 000 mots, incluant le texte, les tableaux et les illustrations. Avant d'entreprendre un essai critique, la personne intéressée devrait prendre conseil auprès du directeur de la revue.

Les revues de livre sont commandées par le directeur chargé des revues de livre afin de rendre compte d'ouvrages particuliers d'importance pour le lectorat canadien. Les personnes intéressées à rédiger des revues de livre sont invitées à faire parvenir au directeur chargé des revues de livre un énoncé sur les domaines qui les intéressent. Les revues de livre non sollicitées pourront être acceptées à la condition qu'elles fassent l'objet d'une évaluation externe.

La rubrique Exemples de géomorphologie canadienne consiste en des textes qui présentent de brèves descriptions explicatives à des fins pédagogiques ou dans le but de soulever des questions sur la recherche en géomorphologie. La longueur des textes de

cette rubrique ne doit pas dépasser 3 000 mots, incluant le texte, les tableaux et les illustrations. Avant de rédiger un texte à soumettre, la personne intéressée devrait solliciter l'opinion du directeur chargé de la rubrique.

La rubrique Paysages urbains canadiens consiste en des textes qui approfondissent des questions relatives au milieu urbain en présentant des perspectives interprétatives sur des paysages urbains canadiens. La longueur des textes de cette rubrique ne doit pas dépasser 3 000 mots, incluant le texte, les tableaux et les illustrations. Avant de rédiger un texte à soumettre, la personne intéressée devrait solliciter l'opinion du directeur chargé de la rubrique.

Les commentaires sont des réponses à des articles publiés, à un éditorial ou à l'opinion d'un spécialiste. Les textes de commentaire sont généralement de courts essais; toutefois, après discussion avec le directeur compétent, des manuscrits plus exhaustifs pourraient être publiés. La longueur de ces textes doit être de 1 000 mots ou moins. La publication des commentaires se fait à la discrétion du directeur compétent qui, avec deux membres du comité de rédaction, procède à un examen par les pairs.

Les notices nécrologiques qui paraissent dans *Le Géographe canadien* respectent les politiques établies par la direction de l'Association canadienne des géographes (ACG). Pour de plus amples renseignements sur les notices nécrologiques, communiquer avec le directeur de la revue.

SOUSSION DE MANUSCRITS

Peu importe le type de manuscrit soumis, l'auteur est prié de soumettre son manuscrit par courrier électronique à l'adresse TCG.editor@cag-acg.ca. Il recevra ensuite un accusé de réception électronique lui indiquant le numéro de suivi de son manuscrit. Sinon, il devrait communiquer avec le directeur de la revue pour vérifier que son manuscrit a bel et bien été reçu. Le manuscrit transmis doit être en Word de Microsoft ou dans un autre logiciel de traitement de texte courant. Si le manuscrit est accepté pour

publication, l'auteur devra être en mesure de présenter alors une version RTF.

Au moment de présenter une soumission, les auteurs doivent présenter une lettre qui :

- i) donne l'assurance que le manuscrit constitue un texte original qui n'est pas considéré pour publication, en tout ou en partie, par une autre revue;
- ii) établit si le manuscrit est indépendant ou s'il fait partie d'une étude ou d'une thèse susceptible d'être la source d'autres manuscrits;
- iii) confirme que tous les auteurs ont lu et approuvé le manuscrit;
- iv) contient les noms des collègues ayant examiné le manuscrit dans ses dernières étapes de préparation.

Les directeurs de la revue :

Directeur

Roger Hayter

Université Simon Fraser

hayter@sfu.ca

Directeur, Géographie physique et les modelés physiques

Ian Saunders

Université de la Colombie-Britannique Okanagan

irsaunders@ouc.bc.ca

Directrice, Science de l'information géographique

Danielle Marceau

Université de Calgary

marceau@geomatics.ucalgary.ca

Directeur, Textes en français

Rodolphe Devillers

Université Memorial de Newfoundland

rdeville@mun.ca

Directeurs, Exemples de paysages urbains canadiens

John C. Everitt et Doug Ramsey

Université de Brandon

Everitt@BrandonU.ca et Ramsey@BrandonU.ca

Directeur, Revues de livre

Ian Lindsay

Université Ryerson

ilindsay@acs.ryerson.ca

LE MANUSCRIT

Toutes les sections du manuscrit, y compris les notes de bas de page, les références, les tableaux et les légendes des illustrations, doivent être imprimées à double interligne, avec des marges de 1 po (2,5 cm). Utiliser les caractères italiques au besoin lorsqu'ils sont disponibles; sinon, souligner les passages qui devraient être en italique. Utiliser les majuscules seulement lorsque les lettres ou les mots doivent apparaître en majuscules dans l'article imprimé. Chaque page du manuscrit doit être numérotée dans le coin supérieur droit. La première page doit comporter uniquement le titre, le nom des auteurs, leur affiliation, leurs numéros de téléphone et de télécopieur, leur adresse de courriel et toute note de bas de page nécessaire. Le titre et le résumé doivent figurer sur la deuxième page (s'assurer qu'il n'y a pas de noms d'auteur après la première page), et être suivis du texte et de la liste de références. Les légendes des tableaux et illustrations doivent figurer sur des pages distinctes et être placées après la liste des références. Le texte et les figures doivent être soumis dans des fichiers électroniques séparés. Indiquer le nom du logiciel de traitement de texte, le numéro de la version, les noms de fichier correspondants et leurs suffixes ainsi que le type d'ordinateur utilisé (IBM ou Macintosh). Pour les figures, se référer à la partie sur les illustrations. Consulter le feuillet sur le style de TCG pour plus de précisions sur les questions de style et de présentation.

Résumé

Le résumé, imprimé sur une page séparée, doit commencer par la référence bibliographique complète de l'article. Il ne doit pas compter plus de 200 mots. Des références ne doivent pas être incluses à moins d'être absolument essentielles; dans ce cas, la référence bibliographique complète doit être fournie. Le nom des organismes vivants doit être en latin et les auteurs doivent être cités. Les résumés doivent être soumis en français et en anglais, à défaut de quoi le manuscrit ne sera pas accepté pour publication.

Remerciements

Un énoncé intitulé Remerciements, d'une longueur n'excédant pas 100 mots, peut être placé à la fin du texte, immédiatement avant les notes et/ou les références.

Notes de bas de page

Les notes de bas de page doivent être désignées par des chiffres arabes en exposant dans l'ordre dans lequel elles apparaissent dans le manuscrit, sauf dans les tableaux. Chaque note de bas de page doit figurer au bas de la page où est indiquée la référence. Il faut restreindre à un absolu minimum l'utilisation des notes de bas de page et s'en servir seulement pour les explications ou les parenthèses nécessaires qui risqueraient d'interrompre l'argumentation dans le corps du texte. Les notes de bas de page ne doivent pas être utilisées pour des références bibliographiques (voir les instructions ci-dessous ayant trait aux références dans le feuillet sur le style).

Préparation des fichiers graphiques électroniques

Les auteurs doivent fournir des copies des fichiers électroniques originaux (c'est-à-dire les fichiers générés par le logiciel utilisé pour les créer) et des épreuves laser de haute qualité des images. Les fichiers électroniques (c'est-à-dire le numéro de la figure et son contenu) doivent correspondre aux épreuves laser et doivent être soumis par courriel une fois que le manuscrit a été accepté pour publication. Dans la lettre au directeur, indiquer i) le logiciel et la version utilisés, ii) les noms des fichiers, leur taille et leur suffixe, iii) s'ils ont été importés d'un autre logiciel. S'il est nécessaire de compresser les fichiers,

utiliser un format de compression compatible avec l'utilitaire Stuffit. Des versions Windows ou Macintosh de polices True Type ou Type 1 doivent être utilisées. Ne pas utiliser de polices de caractères mode point (« bitmap ») ou non standard. Toutes les figures doivent être soumises dans leurs dimensions finales de publication. Pour les figures comportant plusieurs parties (par exemple, a, b, c, d, etc.) créées avec le même logiciel, les grouper dans un seul fichier plutôt que de les envoyer dans plusieurs fichiers séparés.

Permission de reproduction

Si un manuscrit contient du matériel (tableaux, figures, graphiques) protégé par des droits d'auteur, il est de l'obligation de l'auteur d'obtenir une permission écrite du détenteur des droits d'auteur pour reproduire le matériel en formats papier et électronique. Les lettres de permission doivent accompagner le manuscrit soumis.

Épreuves

Des épreuves de l'article et des illustrations, le manuscrit révisé et un bon de commande de tirés à part sont envoyés à l'auteur. Les épreuves doivent être vérifiées soigneusement et retournées dans les 48 heures après la réception. Il ne convient pas, à l'étape de la correction d'épreuve, de faire des corrections, suppressions ou ajouts importants; l'auteur devra assumer le coût des changements qu'il apportera à cette étape et qui seront jugés excessifs.

Transfert des droits d'auteur

Tous les auteurs doivent remplir un formulaire de transfert de droits d'auteur qui remet tous les droits à l'Association canadienne des géographes. Des formulaires de transfert de droits d'auteur sont disponibles auprès des directeurs. Toute requête de permission de republier un article, en tout ou en partie, doit être envoyée à TCG.editor@cag-acg.ca.